

УДК 621.311.21:621.039.64
DOI: 10.18799/24131830/2025/8/5018
Шифр специальности ВАК: 2.4.2
Научная статья

Автономная гидроэнергетическая установка для производства электричества и водорода

Б.В. Лукутин✉, Шамие Ахмад

Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Россия, г. Томск

✉ lukutin48@mail.ru

Аннотация. Актуальность. Основным ограничением широкого распространения водородной энергетики является дороговизна производства водорода. «Зелёная» технология получения водорода основана на электролизе воды с большим расходом электроэнергии, получаемой от экологически чистых, например, возобновляемых энергоисточников. Для улучшения технико-экономических характеристик электролиза воды нужна дешёвая электроэнергия или техническая необходимость сброса её части в балластные нагрузки для стабилизации режима генерирующего энергоисточника, что характерно для энергоустановок возобновляемой энергетики. **Цель.** Предлагается использовать в качестве балласта для стабилизации режима работы микро-гидроэлектростанции (микро-ГЭС) регулируемый электролизёр для формирования управляющего момента для гидроагрегата и получения водорода. Учитывая это обстоятельство, а также низкую стоимость электроэнергии микро-ГЭС – на порядок меньше ветровой и солнечной, представляется актуальной задача создания гибридной энергоустановки, производящей электроэнергию и водород с использованием гидравлического потенциала малых рек в качестве первичного энергоисточника для генерации электроэнергии и речной воды – в качестве сырья для электролизного производства водорода. Цель исследования – технико-экономическое обоснование комбинированного производства электроэнергии и водорода на микро-ГЭС с балластной стабилизацией рабочего режима. **Методы:** аналитические методы в области построения систем энергоснабжения потребителей. **Результаты.** Установлено, что предложенная структура гидроэлектростанции с использованием электролизёра с полимерными электролитными мембранами (РЕМ-типа) обеспечивает относительно дешёвую электроэнергию, а также производит водород по низкой стоимости, примерно 0,99 USD/кг. В статье предлагается использование в качестве балластной нагрузки электролизёра и оригинальный способ его эксплуатации для эффективного распределения электроэнергии микро-ГЭС, часть которой реализуется для создания управляющего тормозного момента гидроагрегата и в обычных гидро-энергоустановках теряется в виде тепла, рассеиваемого на балластных резисторах.

Ключевые слова: водород, микро-гидроэлектростанция, электролизёр, балластная нагрузка, график электропотребления, линеаризованная вольт-амперная характеристика, стабилизация

Для цитирования: Лукутин Б.В., Шамие Ахмад. Автономная гидроэнергетическая установка для производства электричества и водорода // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2025. – Т. 336. – № 8. – С. 120–129. DOI: 10.18799/24131830/2025/8/5018

UDC 621.311.21:621.039.64
DOI: 10.18799/24131830/2025/8/5018
Scientific paper

Autonomous hydropower plant for electricity and hydrogen production

B.V. Lukutin✉, Shamieh Ahmad

National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russian Federation

✉ lukutin48@mail.ru

Abstract. Relevance. The primary limitation to the widespread adoption of hydrogen energy lies in the high cost of hydrogen production. The "green" technology for hydrogen production is based on water electrolysis, which requires a significant amount of electricity, typically sourced from environmentally friendly, renewable energy sources. To improve the technical

and economic performance of water electrolysis, either cheap electricity or the technical necessity to divert part of it to ballast loads for stabilizing the operating mode of the energy source is required, a scenario often observed in renewable energy systems. This work proposes the use of an electrolyzer as a ballast to produce hydrogen. Considering this approach, along with the low cost of electricity generated by micro-hydropower plants an order of magnitude lower than that of wind and solar energy the task of developing a hybrid energy system becomes highly relevant. This system would produce both electricity and hydrogen, utilizing the hydraulic potential of small water streams as the primary energy source for electricity generation and using water as the raw material for hydrogen production via electrolysis. **Aim.** To provide a technical and economic justification for the combined production of electricity and hydrogen at a micro-hydroelectric power plant with ballast stabilization of the operating mode **Methods.** Analytical methods in the field of designing energy supply systems for consumers. **Results.** It is found out that the proposed system for hydroelectric power plant using the electrolyzer with polymer electrolyte membranes based electrochemical analyzer provides relatively cheap electricity and also produces hydrogen at low cost, approximately 0.99 USD/kWh. The paper proposes the use of electrochemical analyzer and its method of operation for efficient utilization of energy that is lost in nature in the form of ballast load.

Keywords: hydrogen, micro-hydropower plant, electrolyzer, ballast load, electricity consumption schedule, linearized voltage-current characteristic, stabilization

For citation: Lukutin B.V., Shamieh Ahmad. Autonomous hydropower plant for electricity and hydrogen production. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2025, vol. 336, no. 8, pp. 120–129. DOI: 10.18799/24131830/2025/8/5018

Введение

Водород становится ключевым элементом глобального перехода к устойчивым низкоуглеродным энергетическим системам. Благодаря своему большому распространению во Вселенной и уникальным свойствам водород является привлекательной альтернативой традиционным ископаемым видам топлива. При использовании в качестве топлива водород выделяет только воду в качестве побочного продукта, что значительно способствует снижению выбросов парниковых газов и борьбе с изменением климата. Водород считается перспективным источником чистой энергии, так как его можно использовать для производства электроэнергии с помощью топливных элементов, что приводит к нулевым выбросам, а побочным продуктом является только вода. Однако использование водорода для производства электроэнергии по-прежнему ограничено сегодня – в мире используются далеко не чистые виды топлива, такие как уголь, нефть и природный газ, на долю которых приходится 85 % мировой энергетической квоты. Они провоцируют выброс парниковых газов, ответственных за глобальное потепление [1–3].

Водород производится в мире различными способами, распределение которых следующее: 48 % из природного газа, 30 % из нефти и тяжелых масел, 18 % из угля, 4 % методом электролиза воды [4, 5].

Водород является перспективным и инновационным решением для проблем хранения энергии. Этот метод позволяет использовать избыточную энергию от электростанций для электролиза воды, что приводит к получению водорода, который можно хранить и использовать по мере необходимости для выработки электроэнергии. Водород считается чистым топливом, так как он не производит углеродных выбросов, что делает его ключевым элемен-

том в борьбе с изменением климата и создании устойчивого энергетического будущего [5, 6].

Мир все больше интересуется водородом: Япония объявила в 2019 г. энергетический план для электромобилей, использующих водородные топливные элементы [7]. Также Соединенные Штаты Америки объявили о водородной программе в 2020 г. [8]. По данным Международного энергетического агентства, к 2030 г. производство водорода, как ожидается, превысит 212 млн т, а к 2050 г. – более 528 млн т [9]. На рис. 1 показана динамика спроса на водород [10].

Производство водорода с помощью электролиза, при котором вода расщепляется на водород и кислород с использованием электричества, становится экологически безопасным, если этот процесс поддерживается возобновляемыми источниками энергии. Этот метод называется производством «зеленого водорода», экологически чистого топлива, которое не выделяет углекислый газ ни при производстве, ни при потреблении. Водород можно производить при использовании солнечной энергии с помощью солнечных фотоэлектрических панелей в регионах с высоким уровнем солнечной активности. Однако колебания солнечной радиации из-за погодных условий и изменений от дня к дню требуют эффективных решений для хранения энергии, чтобы обеспечить непрерывное производство водорода [11, 12].

Для производства водорода с использованием энергии ветра используются ветряные турбины, генерирующие электроэнергию, необходимую для производства водорода, что особенно эффективно в регионах с постоянным и сильным ветром. Например, морские ветропарки могут обеспечивать большие и стабильные объемы энергии. Однако колебания скорости ветра требуют интеграции систем хранения энергии для поддержания стабильных поставок водорода [13].

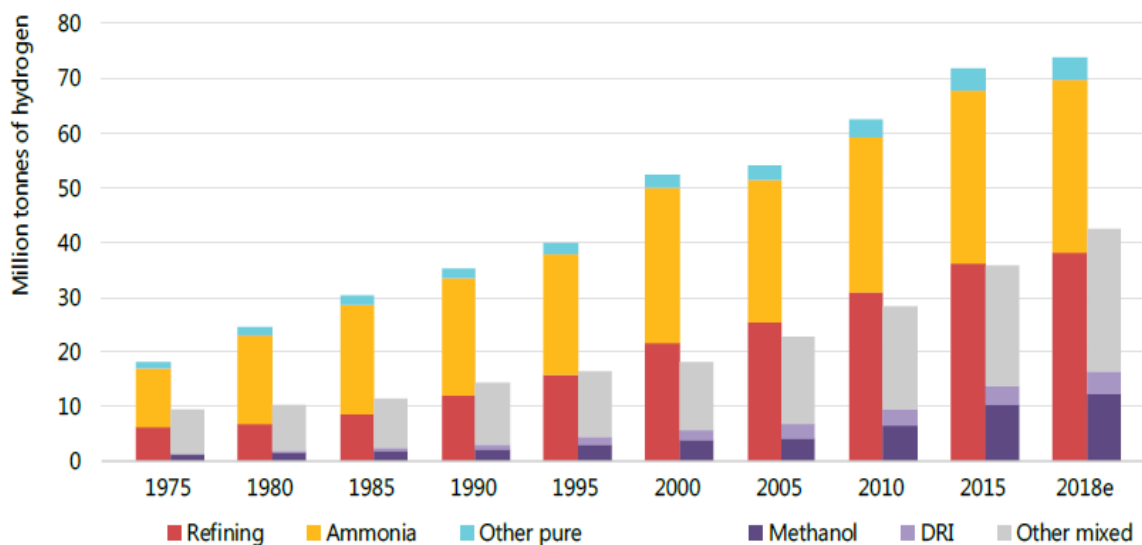


Рис. 1. Мировой годовой спрос на водород с 1975 г.

Fig. 1. Global annual demand for hydrogen since 1975

Гидроэлектростанции производят электроэнергию за счет потока воды, что обеспечивает более стабильный и постоянный источник энергии по сравнению с солнечной и ветровой энергией. Эта стабильность приводит к более устойчивым темпам производства водорода. Кроме того, существующая гидроэнергетическая инфраструктура в ряде регионов может быть использована для производства водорода без значительных инвестиций. Электроэнергия, произведенная в непиковое время или в период отсутствия спроса, а также во время огромных речных потоков весной, может быть запасена в виде водорода, а позже, когда потребуются пиковая энергия, водород будет преобразован в электричество. Одним из преимуществ предлагаемой системы является то, что ресурс для производства водорода (вода) доступен непосредственно на объекте. Представляется, что преобразование электроэнергии на гидроэлектростанциях в водород и его утилизация с помощью газовой турбины технически и экономически осуществимы [14, 15].

Электролизная технология производства водорода

Электролиз воды – это электрохимический процесс, в котором электричество используется для расщепления воды на два газа – водород и кислород [16, 17]. Технологии электролиза воды можно разделить на группы: электролиз щелочной воды, электролиз с использованием полимерных электролитных мембран, электролиз с использованием твердых полимеров, электролиз с использованием анионообменных мембран и электролиз с использованием пара [18, 19].

Электролиз воды осуществляется с помощью электрического потенциала, при котором вода раз-

деляется на кислород и водород, а разность потенциалов между электродами не должна быть меньше 1,23 В.

С точки зрения устойчивости и воздействия на окружающую среду электролиз воды с использованием полимерных электролитных мембран PEM-электролизёрами является одним из благоприятных методов преобразования возобновляемой энергии в высокочистый водород. Данная технология электролиза воды имеет существенные преимущества, такие как компактная конструкция электролизёра, высокая плотность тока (более 2 А см²), высокая эффективность, быстрый отклик, работа при более низких температурах (20–80 °С) и производство сверхчистого водорода, а также производство кислорода в качестве побочного продукта. Эксплуатация установок электролиза PEM очень проста, что привлекательно для промышленного применения. Современные электролизёры для PEM-электролиза отличаются использованием благородных металлов, таких как Pt, Ir, Ru, что делает их более дорогими по сравнению с установками электролиза щелочной воды. Поэтому одной из главных задач в электролизе воды методом PEM является снижение себестоимости водорода и сохранение высокой эффективности [20–22].

Объект исследования

Автономная микро-гидроэлектростанция для обеспечения отдалённого сельского посёлка электроэнергией. Избыточная электроэнергия используется для производства зеленого водорода, который можно будет использовать в часы пикового потребления или продавать. Структурная схема такой установки показана на рис. 2.

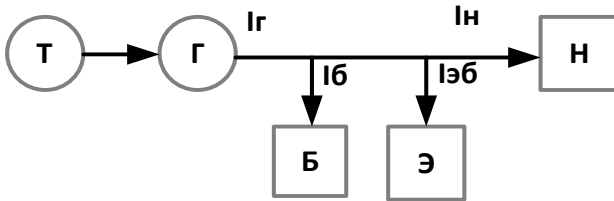


Рис. 2. Структурная схема гибридной энергоустановки: Т – гидротурбина; Г – генератор; Н – нагрузка; Б – балластная нагрузка; Э – электролизёр

Fig. 2. Structural diagram of such a hybrid power plant: Т – hydraulic turbine; Г – generator; Н – load; Б – ballast load; Э – electrolyzer

Рабочими режимами гибридного энергоисточника, в зависимости от величины текущей нагрузки, являются следующие: работа гидрогенератора на нагрузку и электролизёр, работа гидрогенератора на нагрузку и балласт и работа гидрогенератора на электролизёр.

Мощностной баланс гидрогенераторного энергоисточника может быть представлен уравнением:

$$P_p = P_{\Gamma} = P_n + P_6 + P_{\text{эб}} = \text{const},$$

где P_p – мощность рабочего потока воды гидроагрегата; P_{Γ} – мощность гидрогенератора; P_n – мощность нагрузки; P_6 – мощность балласта; $P_{\text{эб}}$ – мощность балластного электролизёра.

Для стабилизации режима работы микро-ГЭС деривационного типа и, соответственно, параметров генерируемого напряжения необходимо обеспечить постоянную величину мощности генератора P_{Γ} во всём диапазоне изменения мощности нагрузки P_n с помощью управления мощностями, потребляемыми электролизным $P_{\text{эб}}$ и резистивным P_6 балластами. Приоритет в степени загрузки балластных нагрузок отдаётся электролизной, а резистивная используется при пуске микро-ГЭС и при мини-

мальных необходимых мощностях балласта, при которых электролизёр не эффективен. Функциональная схема гибридного энергоисточника приведена на рис. 3.

Режимом работы комбинированной гидроэнергоустановки является стабилизация её энергетического баланса при изменении величины нагрузки при гарантированном электроснабжении потребителя. Если мощность нагрузки меньше номинальной мощности стабилизации гидроагрегата, то к ней добавляется мощность, потребляемая балластным электролизёром:

$$P_{\text{эб}} = P_{\Gamma} - P_n = \Delta P.$$

Дополнительным условием включения электролизёра является выполнение неравенства $\Delta P > P_{\text{эмин}}$, где $P_{\text{эмин}}$ – мощность в точке минимума рабочего участка вольтамперной характеристики электролизёра, показанной на рис. 4 [23].

Значения напряжения $U_{\text{эмин}}$ и тока $I_{\text{эмин}}$ характеризуют начало высокопроизводительного режима работы электролизёра на линейном участке его вольтамперной характеристики с малым динамическим сопротивлением, который принят за рабочий в рассматриваемой энергоустановке.

Если $\Delta P < P_{\text{эмин}}$, то электролизёр не включается (или выключается), и стабилизация мощности гидрогенератора до номинального значения осуществляется балластной нагрузкой резистивного типа. Коммутация и регулирование электролизного и резистивного балластов осуществляется устройством управления. Регулирование тока электролизёра производится изменением приложенного напряжения. Регулирование тока резистивного балласта, кроме регулирования величины напряжения, может производиться и изменением его омического сопротивления.

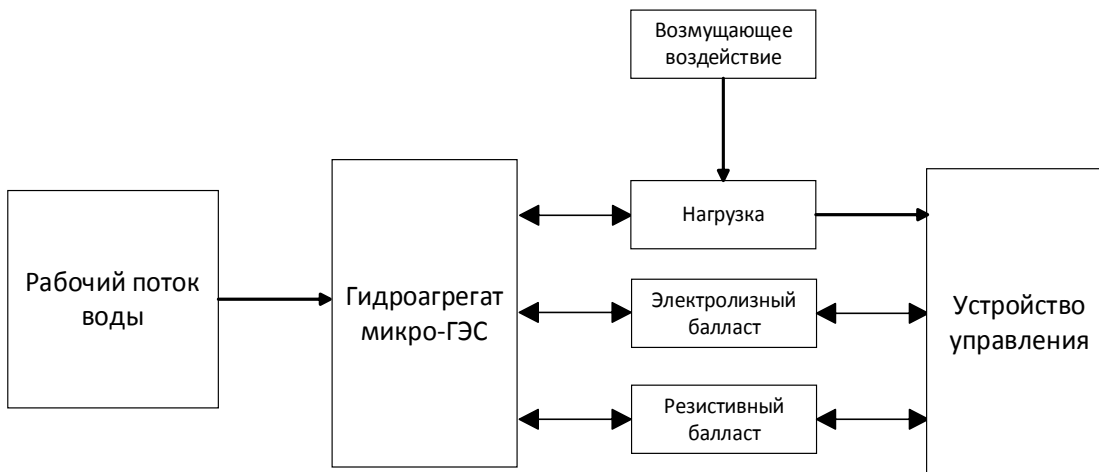


Рис. 3. Функциональная схема гибридного энергоисточника

Fig. 3. Functional diagram of a hybrid energy source

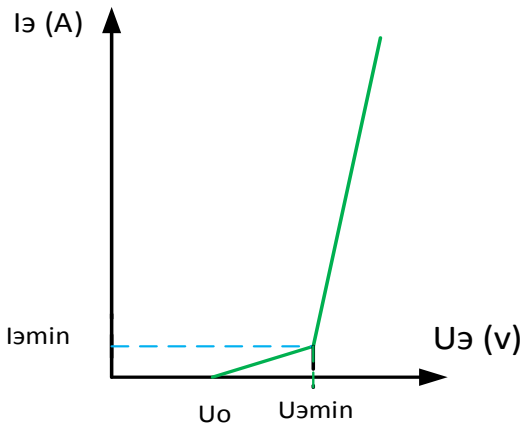


Рис. 4. Линеаризованная вольтамперная характеристика электролизёра

Fig. 4. Linearized volt-ampere characteristic of the electrolyzer

Таким образом, возмущающим воздействием в предлагаемом энергетическом комплексе является электрическая нагрузка автономного потребителя, задаваемая мощностью P_n , управляющими воздействиями – мощности балластов электролизного $P_{эб}$ и резистивного P_6 типов, константами являются номинальная мощность генератора и параметры вольт-амперной характеристики электролизёра $I_{эmin}$, $U_{эmin}$.

Задачами исследования в данной работе являются оценка объёмов получаемого водорода при работе предлагаемой гибридной автономной микро-ГЭС в системе электроснабжения типичного потребителя электроэнергии – небольшого посёлка, а также определение себестоимости производимых энергоресурсов: электроэнергии и водорода.

Решение поставленных задач осуществим на примере энергообеспечения посёлка с типовым графиком суточного электропотребления сельских домов. График приведён на рис. 5, 6.

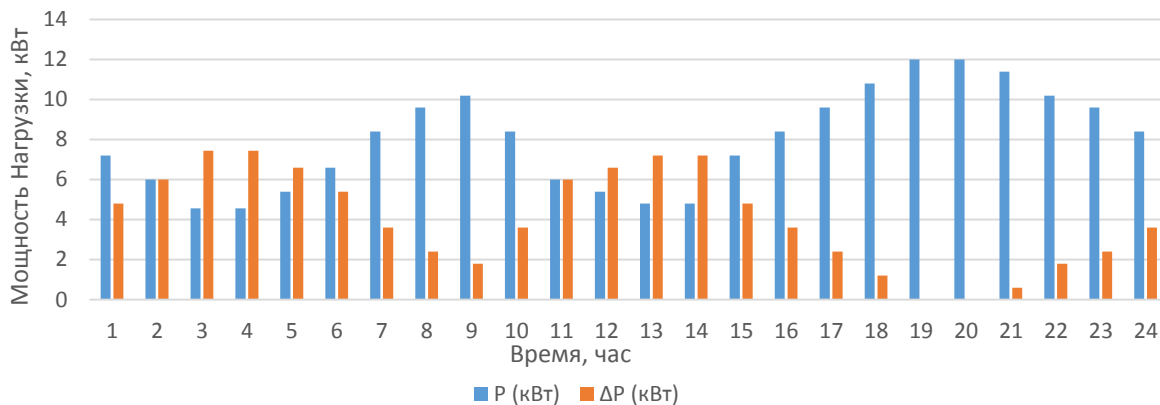


Рис. 5. Типовой график электропотребления населённых пунктов (зимой), разница между максимальной мощностью и мощностью нагрузки (зимой)

Fig. 5. Typical schedule of electricity consumption in settlements (in winter), difference between maximum power and load power (in winter)

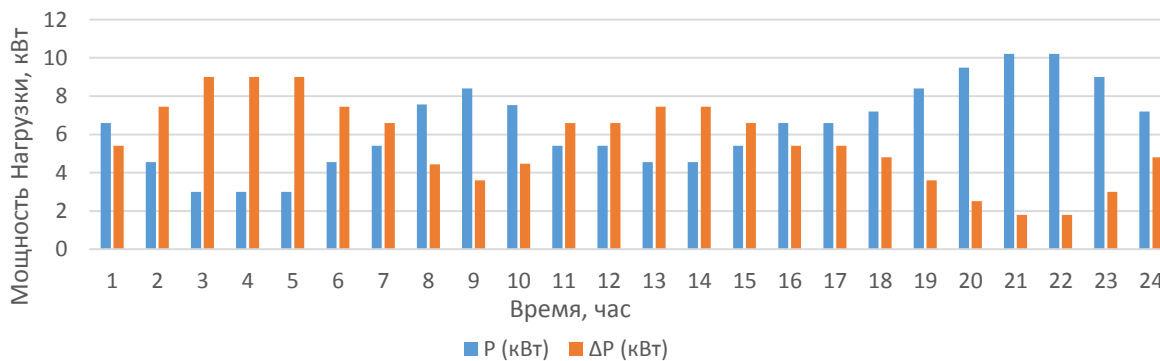


Рис. 6. Типовой график электропотребления населённых пунктов (летом), разница между максимальной мощностью и мощностью нагрузки (летом): P_i – мощность нагрузки, кВт; ΔP_i – разница между максимальной мощностью и текущей мощностью нагрузки

Fig. 6. Typical schedule of electricity consumption in settlements (in summer), difference between maximum power and load power (in summer): P_i – load power, kW; ΔP_i – difference between maximum power and current load power

Номинальная мощность микро-ГЭС выбирается по пиковой мощности потребителя. Примем величину максимума потребляемой мощности 12 кВт. Тогда номинальная мощность деривационной микро-ГЭС должна быть больше пиковой мощности нагрузки и выбираться из ряда промышленных образцов, представленных на рынке. Указанным условиям соответствует Микро-ГЭС GSg 15, производитель ООО «Делан Энерго», Россия. Её конструкция предусматривает деривационный напорный трубопровод диаметром 300 мм с возможным напором от 1 до 15 м. Удельная стоимость стального трубопровода составляет 90 долларов за метр [27]. Примем длину напорного трубопровода равной 100–150 м. Трубопровод снабжается затвором стоимостью 560 USD [26]. Основные характеристики микро-ГЭС приведены в табл. 1 [24].

Таблица 1. Характеристики микрогидроэлектростанции

Table 1. Micro-hydropower plant characteristics

Характеристика/Characteristic	Значение/Value
Мощность гидроагрегата Hydropower unit capacity	14 кВт/kW
Выходное напряжение/Output voltage	380/220 В/V
Частота вращения ротора Rotor rotation frequency	1000 об/мин rpm
Рабочий напор воды/Operating water head	10 м/m
Срок эксплуатации/Service life	до (to) 20 лет/y
Выработка электроэнергии в месяц Monthly electricity generation	До (to) 9720 кВт·ч/kWh
Вес/Weight	140 кг/kg
Цена/Price	6000 USD

В качестве электролизёра можно выбрать промышленную установку PEM типа китайского производства [25], модель GH-002 с энергетическими параметрами, приведёнными в табл. 2.

Таблица 2. Характеристики электролизёра PEM типа

Table 2. PEM electrolyzer characteristics

Характеристика Characteristic	Значение Value
Производительность водорода Hydrogen production rate	2 нм³/ч/nm³/h
Диапазон выхода водорода Hydrogen output range	10–150 %
Параметры постоянного тока/DC parameters	до (to) 98 А/A
Параметры напряжения/Voltage parameters	96–120 В/V
Максимальная мощность/Maximum power	11,76 кВт/kW
Потребляемая электроэнергия Consumed electrical energy	4,5 кВтч /нм³ kWh/nm³
Коэффициент полезного действия электролиза Electrolysis efficiency	80 %
Давление водорода на выходе Hydrogen outlet pressure	0,8–3,2 мПа mPa
Давление воды/Water pressure	0,5 мПа/mPa
Цена/Price	10000 USD

Электролизёр состоит из электролитической ячейки PEM типа, газожидкостного устройства сепарации и очистки, а также вспомогательного инженерного оборудования.

Достоинства выбранной энергоустановки.

1. Регулируемый диапазон производства водорода составляет 10–150 %, адаптируется к флуктуационным изменениям характеристик поступающей электроэнергии.
2. Быстрый запуск и остановка в минутном диапазоне времени для адаптации к периодическим колебаниям возобновляемой энергии. Пуск PEM-электролизёра из холодного состояния – 5 минут, из горячего – 1 секунда.
3. Высококачественные основные компоненты устойчивы к коррозии, имеют большой срок службы – до 20 лет, конструкция проста в обслуживании и пригодна для работы в полевых условиях.
4. Единственные выбросы энергоустановки – водяной пар

Для расчётов энергетических характеристик выбранного электролизёра удобно представить зависимость электролизного тока (А) от напряжения (В) уравнением:

$$I_3 = 3,7(U_3 - 96) + 10. \quad (1)$$

Уравнение (1) справедливо для рабочего диапазона электролизных напряжения 96–120 В и тока 10–98 А. Динамическое сопротивление электролизёра составляет 0,27 Ом.

Мощность, потребляемая электролизёром на i часовом интервале графика электрических нагрузок равна $P_{3i} = I_{3i} * U_{3i}$. Электрическая энергия, поступившая в электролизёр за сутки, определяется по формуле $W_{3c} = \sum_{i=1}^{24} P_{3i}$. Зная удельный расход электроэнергии рассматриваемого электролизёра на получение 1 нм³ водорода – 4,5 кВт·ч, можно оценить суточный объём производства водорода $V = W_{3c} / 4,5$.

Таким образом, математическая модель последовательности статических режимов микро-ГЭС с использованием управляемого электролизёра воды в качестве балластной нагрузки для стабилизации параметров электроэнергии гидроагрегата может быть построена с использованием графиков электропотребления нагрузок электростанции, предложенного алгоритма её работы, параметров промышленных образцов микро-ГЭС и электролизёров, позволяющих получить энергетические характеристики энергоустановки

Математическая модель позволяет оценить объёмы выработки электрической энергии для автономного потребления и «попутного» водорода, который может использоваться в качестве дополнительного энергоресурса в локальной энергетиче-

ской системе. Известные технико-экономические показатели оборудования гибридной энергоустановки и объёмы производимой энергии позволяют оценить стоимость энергетических ресурсов. Количественная сторона электролиза выражается законом Фарадея: количество выделившегося на электроде газообразного вещества прямо пропорционально силе тока и времени электролиза и определяется следующей формулой

$$V_T = V_3 I \cdot t F,$$

где V_T – объем газа, выделившегося на электроде, л; V_3 – эквивалентный объем газа при нормальных условиях (н.у.), который равен отношению объема 1 моля газа при н.у. (V) к сумме валентностей элементов молекулы газа (n). Так как 1 моль газа при н.у. занимает объем, равный 22,4 л, следовательно, V_3 для H_2 равен 11,2 л, а для O_2 – 5,6 л; I – сила тока, А; t – время электролиза (с или час); F – постоянная Фарадея, характеризующая количество электричества, необходимое для выделения эквивалентной массы вещества (96500 Кл, или 26,8 А·ч).

Расчёт количества производимой электроэнергии и водорода

Электрическая энергия, поступившая в электролизёр за сутки, определяется по формуле (зимой):

$$W_{\text{эс-зима}} = \sum_{i=1}^{24} P_i = 96,48 \text{ кВт} \cdot \text{ч}.$$

Электрическая энергия, поступившая в электролизёр за сутки (летом), определяется по формуле:

$$W_{\text{эс-лето}} = \sum_{i=1}^{24} P_i = 134,4 \text{ кВт} \cdot \text{ч}.$$

Объем водорода, производимого за сутки в зимний период, определяется по формуле:

$$V_{H_2\text{-зима}} = \frac{W_{\text{эс-зима}}}{W_H} = \frac{96,484}{4,5} = 21,44 \text{ нм}^3.$$

Учитывая соотношение для водорода: $0,0889 \text{ Кг} = 1 \text{ нм}^3$, получаем суточную массу $M_{\text{зима}}$ для H_2 :

$$21,44 \text{ нм}^3 = 0,0889 \cdot 21,44 = 1,906 \text{ Кг},$$

$$M_{\text{зима}} = 1,906 \text{ Кг}.$$

Объем водорода, производимого за сутки в летний период $M_{\text{лето}}$ равен

$$V_{H_2\text{-лето}} = \frac{W_{\text{эс-лето}}}{W_H} = \frac{134,4}{4,5} = 29,866 \text{ нм}^3,$$

$$M_{\text{лето}} = 2,655 \text{ Кг}.$$

Для расчета затрат на производство водорода сначала рассчитываем стоимость киловатт-часа электроэнергии, учитывая, что срок службы систе-

мы составляет 20 лет, а мощность системы 12 кВт. Таким образом, количество электроэнергии, вырабатываемой системой, составляет:

$$W = 12 \cdot 24 \cdot 365 \cdot 20 = 2102000 \text{ кВт} \cdot \text{ч}.$$

Для расчета стоимости киловатт-часа определяем затраты. Начальная стоимость оборудования составляет 29910 USD, что включает затраты на электролизер и станцию. Примем, что ежегодные эксплуатационные расходы составляют 2 % от стоимости системы, тогда общие затраты за 20 лет будут равны 41874 USD. Стоимость одного киловатт-часа электроэнергии рассчитывается по формуле:

$$C_{\text{кВт*ч}} = \frac{41\,874}{2\,102\,400} = 0,0199 \frac{\text{USD}}{\text{кВт} \cdot \text{ч}},$$

где $C_{\text{кВт*ч}}$ – затраты на производство киловатт-часа. Для производства 1 Nm^3 водорода требуется 4,5 кВт·ч электроэнергии. Для производства 1 кг водорода, что эквивалентно примерно 11,2 Nm^3 , необходимо около 50 кВт·ч. Таким образом, стоимость производства 1 кг водорода определяется следующей формулой

$$C_{H_2} = 50 \cdot 0,0199 = 0,99 \frac{\text{USD}}{\text{кг}},$$

где C_{H_2} – затраты на производство килограмма водорода.

Энергетический коэффициент использования установленной мощности станции, с учётом производимых энергоресурсов: электричества и водорода, рассчитывается на интервале средних суток по выражению:

$$K_{\text{ис}} = \frac{\sum_{i=1}^{24} \Delta P_i + \sum_{i=1}^{24} P_i}{12 \cdot 24} \approx 1,$$

где $K_{\text{ис}}$ – коэффициент использования установленной мощности станции.

Расчет затрат на производство товарной электроэнергии на станции без производства водорода может выполняться таким же способом, как и ранее, при этом базовая стоимость составляет 19910 \$, а при ежегодных расходах на обслуживание 2 % общие расходы за 20 лет составят 27874 USD. Стоимость одного киловатт-часа электроэнергии рассчитывается по формуле:

$$C'_{\text{кВтч}} = \frac{27\,874}{2\,102\,400} = 0,0135 \text{ USD/кВт} \cdot \text{ч},$$

где $C'_{\text{кВтч}}$ – затраты на производство киловатт-часа без получения водорода.

Коэффициент использования установленной мощности станции в этом случае рассчитывается для средних суток по формуле:

$$K_{\text{ис}} = \frac{\sum_{i=1}^{24} P_{i\text{-зима}} + \sum_{i=1}^{24} P_{i\text{-лето}}}{12 \cdot 48} \approx 0,4.$$

Производственные затраты приведены в табл. 3

Таблица 3. Затраты на электроэнергию и производство водорода

Table 3. Electricity and hydrogen production costs

Характеристика/Тип Characteristic/Type	С производством водорода With hydrogen production	Без производства водорода Without hydrogen production
$C_{кВтч}$ USD/кВт·ч/kWh	0,0199	0,0135
$K_{ис}$	1	0,4
C_{H_2} USD/кг/kg	0,99	–

Заключение

Проведённые исследования подтвердили технико-экономическую целесообразность использования в автономных энергетических системах микро-гидроэлектростанций автобалластного типа для комбинированного производства электричества и водорода за счёт гидравлической энергии водотока.

Предложена структура и алгоритм взаимодействия между элементами гибридной гидравлической системы, включающей микро-гидроэлектростанцию с двумя типами управляемых балластных нагрузок: резистивной и электролизной РЕМ типа, которая в

процессе стабилизации режима работы гидроагрегата производит водород. Производство товарных энергоресурсов разной физической природы: электроэнергии и водорода, определяет максимальный коэффициент использования установленной мощности гидроагрегата, приближающийся к единице.

Экономические характеристики производимых энергоресурсов подтверждают перспективность предлагаемой комбинированной энергоустановки: расчётная себестоимость килограмма водорода при принятых допущениях менее 1 \$, при ценах в США – от 3,7 до 10 \$. Себестоимость товарной электроэнергии за счёт дополнительных затрат на электролизёр возрастает при прочих равных условиях: расчётная себестоимость 1 кВт·ч увеличилась с 0,0135 до 0,0199 \$, что для автономных систем электроснабжения вполне приемлемо.

Возвращение в энергетический или финансовый балансы автономной энергетической системы произведённого водорода может дополнительно повысить привлекательность комбинированной гидро-энергетической установки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Power-to-hydrogen and hydrogen-to-X energy systems for the industry of the future in Europe / M. Genovese, A. Schlüter, E. Scionti, F. Piraino, O. Corigliano, P. Fragiaco // International Journal of Hydrogen Energy. – 2023. – Vol. 48. – № 44. – P. 16545–16568.
2. Momirlan M., Veziroglu T.N. The properties of hydrogen as fuel tomorrow in sustainable energy system for a cleaner planet // International Journal of Hydrogen Energy. – 2005. – Vol. 30. – № 7. – P. 795–805.
3. Review of hydrogen economy in Malaysia and its way forward / A. Xin Yee Mah, W. Shin Ho, C. Phun Chien Bong, M.H. Hassim, P. Yen Liew, U. Aisah Asli, G.C. Nishanth // International Journal of Hydrogen Energy. – 2019. – Vol. 44. – № 7. – P. 5661–5675.
4. Mojtaba Qolipour, Ali Mostafaeipour, Omid Mohseni Tousi. Techno-economic feasibility of a photovoltaic-wind power plant construction for electric and hydrogen production: a case study // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2017. – Vol. 78. – P. 113–123.
5. Zutte A. Hydrogen storage methods // Naturwissenschaften. – 2004. – № 4. – P. 157–172.
6. Turner J.A. Sustainable hydrogen production // Science. – 2007. – Vol. 30. – P. 972–974.
7. Production of green hydrogen from sewage sludge/algae in agriculture diesel engine: performance evaluation / V. Rathinavelu, A. Kulandaivel, A. Kumar Pandey, A. Hossain Seikh, A. Iqbal, I. Hossain, P. Murugan, A. Iqba // Heliyon. – 2024. – Vol. 10. – № 1. – e23988.
8. Optimisation of multi-period renewable energy systems with hydrogen and battery energy storage: AP-graph approach / Mengmeng Ji, Wan Zhang, Yifan Xu, Qi Liao, Jiri Jaromir Klemes, Bohong Wang // Energy Conversion and Management. – 2023. – Vol. 281. – 116826.
9. Experimental assessment of performance and emissions for hydrogen-diesel dual fuel operation in a low displacement compression ignition engine / L. Estrada, E. Moreno, A. Gonzalez-Quiroga, A. Bula, J. Duarte-Forero // Heliyon. – 2022. – Vol. 8. – № 4. – e09285.
10. The Future of Hydrogen. Report prepared by the IEA for the G20, Japan. URL: chrome-extension://efaidnbmninnibpcapjpcglclefindmkaj/https://iea.blob.core.windows.net/assets/9e3a3493-b9a6-4b7d-b499-7ca48e357561/The_Future_of_Hydrogen.pdf (дата обращения 14.02.2025).
11. Solar-hydrogen storage system: architecture and integration design of university energy management systems / S.R. Joshua, S. Park, K. Kwon, A. Na Yeon // Applied Sciences. – 2024. – Vol. 14. – № 4. – 4376.
12. Glenk G., Reichelstein S. Economics of converting renewable power to hydrogen, Nature Energy // Nature Energy. – 2019. – № 4. – P. 216–222.
13. Economic analysis of hydrogen energy systems: a global perspective / Guoqing Liu, Tingting Guo, Ping Wang, Hua Jiang, Hongguang Wang, Xue Zhao, Xiaoyan Wei, Ying Xu // Heliyon. – 2024. – Vol. 10. – № 18. – e36219.
14. Tarnay D.S. Hydrogen production at hydro-power plants // International Journal of Hydrogen Energy. – 1985. – Vol. 10. – № 9. – P. 577–584.
15. Hybrid electrical energy generation from hydropower, solar photovoltaic and hydrogen / G.M. Lima, F.N. Belchior, J.E. Neira Villena, J.L. Domingos, M.A. Vasconcelos Freitas, J.D. Hunt // International Journal of Hydrogen Energy. – 2024. – Vol. 53. – P. 602–612.

16. Smolinka T. Fuels-hydrogen production. Water electrolysis // Encyclopedia of Electrochemical Power Sources. – Philadelphia: University City Science Center, 2009. – P. 394–413.
17. Sahin M.E. An overview of different water electrolyzer types for hydrogen production // Energies. – 2024. – Vol. 10. – 4944 p.
18. Edwards P., David B., Kuznetsov V.L. Hydrogen energy // Philosophical Transactions A. – 2007. – Vol. 365. – P. 1043–1056.
19. Impacts of intermittency on low-temperature electrolysis technologies: A comprehensive review / E. Nguyen, P. Olivier, M.-C. Pera, E. Pahan, R. Roche // International Journal of Hydrogen Energy. – 2024. – Vol. 70. – P. 10605–10614.
20. Baykara S.Z. Hydrogen: a brief overview on its sources, production and environmental impact // International Journal of Hydrogen Energy. – 2018. – Vol. 43. – № 23. – P. 474–492.
21. Nikolaidis P., Poullikkas A. A comparative overview of hydrogen production processes // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2017. – Vol. 67. – P. 597–611.
22. Phosphorus doped carbon nanoparticles supported palladium electrocatalyst for the hydrogen evolution reaction (HER) in PEM water electrolysis / Shiva Kumar Sampangi, Udaya Bhaskara Ramakrishna Siripall, Himabindu Vurimindi // International Journal of Ionics. – 2018. – Vol. 24. – P. 3113–3121.
23. Бедретдинов Р.Ш. Экономическая оценка эффективности применения гибридного энергетического комплекса на основе водорода // Интеллектуальная электротехника. – 2021. – № 4. – С. 47–58.
24. Делан энерго. Основные характеристики Микро ГЭС GSG-15. URL: <https://dealanenergo.ru/nasha-produktsiya/ges/ges-akula-2> (дата обращения 14.02.2025).
25. green-hh. Main characteristics of electrolyzer. URL: <https://www.green-hh.com/PEM-Hydrogen-Electrolyzer-pd552114268.html> (дата обращения 14.02.2025).
26. valveI. Characteristics of Ductile iron butterfly valve, grooved type, 300 psi. URL: https://shop.valveit.com/en/butterfly/221-2362-vitbfg300.html#/58-diameter_inch-12 (дата обращения 14.02.2025).
27. Made in China. 300mm High Quality Price PVC Pipe PVC Pipe Price and PVC Pipe. URL: <https://bestalsteel.en.made-in-china.com/product/wOBAYksHkjRr/China-300mm-High-Quality-Price-PVC-Pipe-PVC-Pipe-Price-and-PVC-Pipe.html> (дата обращения 14.02.2025).

Информация об авторах

Борис Владимирович Лукутин, доктор технических наук, профессор отделения электроэнергетики и электротехники Инженерной школы энергетики Национального исследовательского Томского политехнического университета, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30. lukutin48@mail.ru

Шамие Ахмад, магистрант отделения электроэнергетики и электротехники Инженерной школы энергетики Национального исследовательского Томского политехнического университета, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30. sa06@tpu.ru

Поступила в редакцию: 20.02.2025

Поступила после рецензирования: 11.04.2025

Принята к публикации: 18.06.2025

REFERENCES

1. Genovese M., Schlüter A., Scionti E., Piraino F., Corigliano O., Fragiaco P. Power-to-hydrogen and hydrogen-to-X energy systems for the industry of the future in Europe. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2023, vol. 48, no. 44, pp. 16545–16568.
2. Momirlan M., Veziroglu T.N. The properties of hydrogen as fuel tomorrow in sustainable energy system for a cleaner planet. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2005, vol. 30, no. 7, pp. 795–805.
3. Xin Yee Mah A., Shin Ho W., Phun Chien Bong C., Hassim M.H., Yen Liew P., Aisah Asli U., Nishanth G. // Review of hydrogen economy in Malaysia and its way forward. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2019, vol. 44, no. 7 pp. 5661–5675.
4. Mojtaba Qolipour, Ali Mostafaeipour, Omid Mohseni Tousi. Techno-economic feasibility of a photovoltaic-wind power plant construction for electric and hydrogen production: a case study. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2017, vol. 78, pp. 113–123.
5. Zutte A. Hydrogen storage methods. *Naturwissenschaften*, 2004, no. 4, pp. 157–172.
6. Turner J.A. Sustainable hydrogen production. *Science*, 2007, vol. 30, pp. 972–974.
7. Rathinavelu V., Kulandaivel A., Kumar Pandey A., Hossain Seikh A., Iqbal A., Hossain I., Murugan P., Iqba A. Production of green hydrogen from sewage sludge/algae in agriculture diesel engine: performance evaluation. *Heliyon*, 2024, vol. 10, no. 1, e23988.
8. Mengmeng Ji, Wan Zhang, Yifan Xu, Qi Liao, Jiri Jaromir Klemes, Bohong Wang. Optimisation of multi-period renewable energy systems with hydrogen and battery energy storage: AP-graph approach. *Energy Conversion and Management*, 2023, vol. 281, 116826.
9. Estrada L., Moreno E., Gonzalez-Quiroga A., Bula A., Duarte-Forero J. Experimental assessment of performance and emissions for hydrogen-diesel dual fuel operation in a low displacement compression ignition engine. *Heliyon*, 2022, vol. 8, no 4, e09285.
10. *The future of hydrogen*. Report prepared by the IEA for the G20, Japan. Available at: chrome-extension://efaidnbmnnnibpcjpcglclefindmkaj/https://iea.blob.core.windows.net/assets/9e3a3493-b9a6-4b7d-b499-7ca48e357561/The_Future_of_Hydrogen.pdf (accessed 14 February 2025).
11. Joshua S.R., Park S., Kwon K., Na Yeon A. Solar-hydrogen storage system: architecture and integration design of university energy management systems. *Applied Sciences*, 2024, vol. 14, no. 4, 4376.
12. Glenk G., Reichelstein S. Economics of converting renewable power to hydrogen, *Nature Energy*. *Nature Energy*, 2019, no. 4, pp. 216–222.

13. Guoqing Liu, Tingting Guo, Ping Wang, Hua Jiang, Hongguang Wang, Xue Zhao, Xiaoyan Wei, Ying Xu. Economic analysis of hydrogen energy systems: a global perspective. *Heliyon*, 2024, vol. 10, no. 18, e36219.
14. Tarnay D.S. Hydrogen production at hydro-power plants. *International Journal of Hydrogen Energy*, 1985, vol. 10, no. 9, pp. 577–584.
15. Lima G.M., Belchior F.N., Neira Villena J.E., Domingos J.L., Vasconcelos Freitas M.A., Hunt J.D. Hybrid electrical energy generation from hydropower, solar photovoltaic and hydrogen. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2024, vol. 53, pp. 602–612.
16. Smolinka T. Fuels-hydrogen production. Water electrolysis. *Encyclopedia of Electrochemical Power Sources*. Philadelphia, University City Science Center, 2009. pp. 394–413.
17. Sahin M.E. An overview of different water electrolyzer types for hydrogen production. *Energies*, 2024, vol. 10, pp. 4944.
18. Edwards P., David B., Kuznetsov V.L. Hydrogen energy. *Philosophical Transactions A*, 2007, vol. 365, pp. 1043–1056.
19. Nguyen E., Olivier P., Pera M.-C., Pahon E., Roche R. Impacts of intermittency on low-temperature electrolysis technologies: A comprehensive review. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2024, vol. 70, pp. 10605–10614.
20. Baykara S.Z. Hydrogen: a brief overview on its sources, production and environmental impact. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2018, vol. 43, no. 23, pp. 474–492.
21. Nikolaidis P., Poullikkas A. A comparative overview of hydrogen production processes. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2017, vol. 67, pp. 597–611.
22. Shiva Kumar Sampangi, Udaya Bhaskara Ramakrishna Siripall, Himabindu Vurimindi. Phosphorus doped carbon nanoparticles supported palladium electrocatalyst for the hydrogen evolution reaction (HER) in PEM water electrolysis. *International Journal of Ionics*, 2018, vol. 24, pp. 3113–3121.
23. Bedretdinov R.Sh. Economic evaluation of the application efficiency of the hybrid energy complex based on hydrogen. *Intellectual Electrical Engineering*, 2021, no. 4, pp. 47–58. (In Russ.)
24. *Delane energy. Main characteristics of MicroGES GSg-15*. (In Russ.) Available at: <https://dealanenergo.ru/nasha-produktsiya/ges/ges-akula-2> (accessed 14 February 2024).
25. *green-hh. Main characteristics of electrolyzer*. Available at: <https://www.green-hh.com/PEM-Hydrogen-Electrolyzer-pd552114268.html> (accessed 14 February 2024).
26. *valveI. Characteristics of Ductile iron butterfly valve, grooved type, 300 psi*. Available at: https://shop.valveit.com/en/butterfly/221-2362-vitbfg300.html#/58-diameter_inch-12 (accessed 14 February 2024).
27. *Made in China. 300mm High Quality Price PVC Pipe PVC Pipe Price and PVC Pipe*. Available at: <https://bestalsteel.en.made-in-china.com/product/wOBAYksHkjRr/China-300mm-High-Quality-Price-PVC-Pipe-PVC-Pipe-Price-and-PVC-Pipe.html> (accessed 14 February 2024).

Information about the authors

Boris V. Lukutin, Dr. Sc., Professor, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation. lukutin48@mail.ru

Shameh Ahmad, Master's Student, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation. sa06@tpu.ru

Received: 20.02.2025

Revised: 11.04.2025

Accepted: 18.06.2025