

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ И КОМПЛЕКСЫ



УДК 621.357.12:62-622:621.039

DOI:10.30724/1998-9903-2025-27-4-104-122

ОСОБЕННОСТИ ЭЛЕКТРОЛИЗА ВОДЫ ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ ПРИ ОЦЕНКЕ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ КОМБИНИРОВАНИЯ АЭС С ВОДОРОДНЫМ КОМПЛЕКСОМ

Байрамов А.Н.^{1,2}, Макаров Д.А.^{1,2}, Седелкин В.М.²

¹Отдел энергетических проблем ФИЦ «Саратовский научный центр РАН», г. Саратов, Россия

²Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А., г. Саратов, Россия
art2198@yandex.ru

Резюме: АКТУАЛЬНОСТЬ исследования комбинирования АЭС с водородным комплексом обосновывается необходимостью адаптации атомных станций к переменному энергопотреблению в течении суток в условиях их привлечения к регулированию неравномерности суточных графиков электрической нагрузки при сохранении базисной нагрузки. ЦЕЛЬ. Оценка термодинамической эффективности комбинирования АЭС с водородным комплексом для покрытия пиковой нагрузки в энергосистеме с учетом особенностей процесса электролиза воды под высоким давлением. МЕТОДЫ. На основе мирового опыта проанализирован механизм перекрестного проникновения водорода и кислорода, а также решения, направленные на предотвращение этого явления. Оценка термодинамической эффективности комбинирования АЭС с водородным комплексом выполнялась на основе математико-термодинамической модели развернутой тепловой схемы ПТУ АЭС с использованием формуляций IAPWS-IF97. РЕЗУЛЬТАТЫ. На основе обобщенного анализа авторами установлена и объяснена закономерность снижения КПД электролиза с ростом давления из-за явления перекрестного проникновения. Разработаны комплексные номограммы закономерности влияния рабочего давления на основные характеристики электролиза, в частности, КПД, удельный расход электроэнергии на производство водорода, рабочее напряжение на ячейке. Получено, что водородный комплекс на основе электролиза высокого давления оказывается эффективнее системы с использованием компрессоров по критериям преобразования провальной мощности в пиковую и КПД АЭС. ВЫВОДЫ. Авторами разработан и запатентован новый принцип комбинирования АЭС с водородным комплексом на основе электролиза воды высокого давления и показана его эффективность в условиях влияния перекрестного проникновения водорода и кислорода в сравнении с системой при использовании компрессорных машин в составе водородного комплекса.

Ключевые слова: атомная электростанция; водородный комплекс; электролиз воды высокого давления; взаимное проникновение газов; термодинамическая эффективность.

Для цитирования: Байрамов А.Н., Макаров Д.А., Седелкин В.М. Особенности электролиза воды высокого давления при оценке термодинамической эффективности комбинирования АЭС с водородным комплексом // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2025. Т. 27. № 4. С. 104-122. doi: 10.30724/1998-9903-2025-27-4-104-122.

FEATURES OF HIGH-PRESSURE WATER ELECTROLYSIS IN ASSESSING THE THERMODYNAMIC EFFICIENCY OF COMBINING NUCLEAR POWER PLANTS WITH A HYDROGEN COMPLEX

Bayramov A.N.^{1,2}, Makarov D.A.^{1,2}, Sedelkin V.M.²

¹Department of Energy Problems, Federal Research Center "Saratov Scientific Center of the Russian Academy of Sciences", Saratov, Russia

²Saratov State Technical University named after Y.A. Gagarin, Saratov, Russia
art2198@yandex.ru

Abstract: The RELEVANCE of the study of combining nuclear power plants with the hydrogen complex is substantiated by the need to adapt nuclear power plants to variable energy consumption during the day in the conditions of their involvement in regulating the unevenness of daily schedules of electric load while maintaining the basic load. PURPOSE. Assessment of the thermodynamic efficiency of combining a nuclear power plant with a hydrogen complex to cover the peak load in the power system, taking into account the features of the process of water electrolysis under high pressure. METHODS. Based on world experience, the mechanism of cross-penetration of hydrogen and oxygen, as well as solutions aimed at preventing this phenomenon, are analyzed. The assessment of the thermodynamic efficiency of combining NPPs with a hydrogen complex was carried out on the basis of a mathematical and thermodynamic model of the expanded thermal scheme of the NPP using the IAPWS-IF97 formulations. RESULTS. On the basis of the generalized analysis, the authors established and explained the regularity of the decrease in the efficiency of electrolysis with an increase in pressure due to the phenomenon of cross-penetration. Complex nomograms of the regularities of the influence of working pressure on the main characteristics of electrolysis, in particular, efficiency, specific consumption of electricity for hydrogen production, operating voltage on the cell, have been developed. It was obtained that the hydrogen complex based on high-pressure electrolysis turns out to be more efficient than the system using compressors in terms of the criteria for converting the using power into the peak power and the efficiency of the nuclear power plant. CONCLUSIONS. The authors have developed and patented a new principle of combining nuclear power plants with a hydrogen complex based on high-pressure water electrolysis and shown its efficiency under the influence of cross-penetration of hydrogen and oxygen in comparison with the system when using compressor machines as part of a hydrogen complex.

Keywords: nuclear power plant; hydrogen complex; high-pressure water electrolysis; mutual penetration of gases; thermodynamic efficiency.

For citation: Bayramov A.N., Makarov D.A., Sedelkin V.M. Features of high-pressure water electrolysis in assessing the thermodynamic efficiency of combining nuclear power plants with a hydrogen complex. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2025; 27 (4): 104-122. doi: 10.30724/1998-9903-2025-27-4-104-122.

Введение (Introduction)

Энергетическая стратегия Российской Федерации на период до 2035 года [1], отражает актуальность и перспективность проводимых исследований, связанных с водородной энергетикой. В условиях мировой парадигмы о декарбонизации это задает характерный вектор разработок водородных технологий с учетом растущего значения целесообразности производства чистого («зеленого») водорода за счет возобновляемых источников энергии и АЭС безуглеродными методами, одним из которых является электролиз воды.

На сегодняшний день в различных научно-исследовательских организациях и научно-производственных объединениях в ряде стран мира, таких как Россия, США, Канада, Франция, Испания, Голландия, Чехия, Турция, Швейцария, Испания, Индия, Индонезия, Австрия, Южная Корея, ЮАР, Китай и Япония, ведутся работы по всестороннему совершенствованию получения водорода методом электролиза воды. Среди решаемых проблем [2]: поиск эффективных катализаторов как альтернатива металлов платиновой группы; новые технологии создания электродов и разделительных мембран; новые технологии электролиза; применение специальных активационных добавок в электролит, а также новых химических составов электролитов; повышение рабочего давления электролиза; применение магнитного поля; математическое моделирование и оптимизация затрат процесса электролиза; разработка интеллектуальных систем управления процессом электролиза; вопросы безопасности, надежности и долговечности; вопросы чистоты водорода; проблемы высокотемпературного электролиза пара.

Цель исследования заключается в проведении обобщенного и подробного анализа проблемы совершенствования электролиза воды за счет повышения рабочего давления на основе мировой практики.

Научная и практическая значимость работы обусловлена проблемой обеспечения АЭС базисной нагрузкой в условиях увеличения их доли в энергосистемах и привлечения к участию в регулировании суточной неравномерности электрической нагрузки в диапазоне до 50% от номинальной мощности [1]. Одним из перспективных решений является

комбинирование АЭС с водородным комплексом как средство обеспечения АЭС базисной нагрузкой. Авторами разработана новая концепция комбинирования АЭС с водородным комплексом на основе электролиза воды высокого давления без использования компрессорных машин до и после системы хранения водорода и кислорода [3], что является более надежным по критерию вероятности безотказной работы водородного комплекса в целом по сравнению с вариантом при использовании компрессорных машин [4].

К настоящему времени имеются научные основы по проблеме комбинирования АЭС с водородным комплексом, в частности, известны принципы, повышающие безопасность использования водорода в паротурбинном цикле АЭС, в том числе с реализацией подземного размещения основного оборудования и применения рекомбинаторов и устройств магнитной сепарации непрореагировавшего водорода. Существенный вклад в исследуемую теорию комбинирования вносят оценка снижения рисков, связанных со взрывом и пожаром гремучей смеси, и анализ рабочего ресурса используемого оборудования [5, 6].

На рисунке 1 приведены принципиальные схемы комбинирования АЭС с водородным комплексом с использованием компрессорных машин [5, 6] и высокого давления [3].

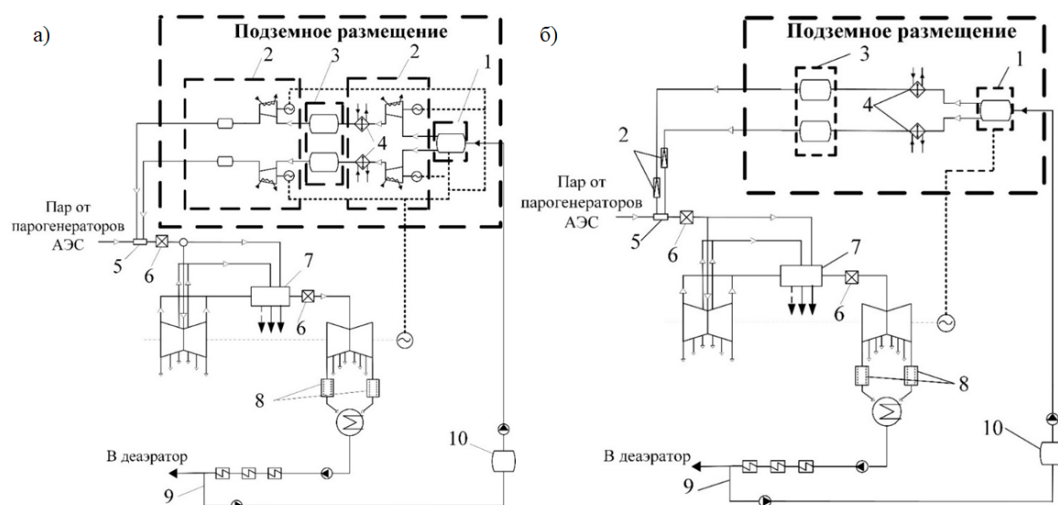


Рис. 1. Принципиальные схемы комбинирования АЭС с водородным комплексом: а) с использованием компрессорных установок; б) высокого давления; 1 – система электролизеров; 2 (а) – система компримирования водорода и кислорода; 2 (б) – система редукционных установок; 3 – емкостная система хранения водорода и кислорода; 4 – охлаждающие теплообменники; 5 – водород-кислородная камера сгорания; 6 – каталитический рекомбинатор; 7 – сепаратор-пароперегреватель; 8 – устройство магнитной сепарации непрореагировавшего водорода; 9 – рециркуляция добавленного рабочего тела; 10 – бак-аккумулятор

Fig. 1. Schematic diagrams of combining NPPs with a hydrogen complex: a) using compressor units; b) high pressure; 1 – electrolyzer system; 2 (a) – hydrogen and oxygen compression system; 2 (b) – system of reducing devices; 3 – capacitive hydrogen and oxygen storage system; 4 – cooling heat exchangers; 5 – hydrogen-oxygen combustion chamber; 6 – catalytic recombiner; 7 – separator-superheater; 8 – device for magnetic separation of unreacted hydrogen; 9 – recirculation of the added working fluid; 10 – accumulator tank

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Принцип работы водородного комплекса с использованием компрессоров (а) и высокого давления (б):

а) В часы разгрузки невостребованная мощность преобразуется в системе электролизеров в водород и кислород, которые при помощи компрессоров запасаются в системе хранения на основе цилиндрических емкостей со сферическими днищами под невысоким давлением. В пиковые часы электрической нагрузки при помощи дожимных компрессорных установок водород и кислород отбираются из системы хранения для выработки пиковой мощности за счет сжигания в системе водород-кислородных камер сгорания с целью перегрева рабочего тела ПТУ АЭС и выработки пиковой мощности. При этом нагрузка реактора и парогенераторов не изменяется в течение суток.

б) В провальные часы невостребованная электроэнергия потребляется электролизерами с выработкой водорода и кислорода под высоким давлением, которые аккумулируются в системе хранения на основе емкостей из композитного материала высокой прочности. В период пиковых нагрузок в энергосистеме производится подача водорода и кислорода в систему сжигания водород-кислородных камер сгорания с целью перегрева рабочего тела ПТУ АЭС и выработки пиковой мощности. Подача водорода и кислорода осуществляется посредством системы редукционных установок с целью выравнивания давления с давлением свежего пара во избежание гидроудара турбины.

На сегодняшний день мировым научным сообществом все активнее проводятся работы в области электролиза воды, в том числе с реализацией высокого давления. Повышенный интерес к исследуемому способу получения газообразного водорода характеризуется необходимостью создания эффективного средства аккумулирования энергии, а также потребностью снижения выбросов углекислого газа при производстве водорода.

Более подробное описание принципа действия, в том числе необходимое количество основного и резервного оборудования водородного комплекса на основе электролиза воды высокого давления приведено в работе [4].

Литературный обзор (Literature Review)

Основы технологии электролизеров с протонообменной мембраной

Ряд современных исследований электролизеров для производства водорода сосредоточены на технологии использования протонообменной мембраны, поскольку, в сравнении с щелочным типом, РЕМ-электролизер представляется более перспективной технологией благодаря устойчивости к большим плотностям тока и высокой достигаемой чистоте вырабатываемых газов. Кроме того, образующийся водород может находиться под давлением в ходе электролиза благодаря низкой газопроницаемости и высокой механической стойкости мембраны [7].

Таким образом, водород под высоким давлением возможно производить непосредственно в электролизере, а не сжимать механическими компрессорами [8].

Протонообменные мембраны обладают рядом физических свойств, необходимых для работы в электролизерах воды РЕМ: высокая ионная проводимость, низкая электронная проводимость, химическая и механическая стабильность, долговечность, высокая теплопроводность и ограниченная проницаемость для водорода и кислорода [9-14].

Ячейка электролизера с протонообменной мембраной ограничена двумя концевыми пластинами, изготовленными из титана. Структура мембраны и электрода, принятая в РЕМ-электролизерах, тоньше и прочнее, чем у сепарационного устройства щелочного электролизера, что обеспечивает меньшее омическое сопротивление, более высокую плотность тока и способность выдерживать большую разницу давлений между отсеками ячейки.

В РЕМ-электролизерах образующиеся газообразные водород и кислород накапливаются в катодном и анодном отсеках, соответственно, и, если рабочее давление установлено выше атмосферного, то отводятся в резервуар для хранения при достижении необходимого давления [15, 16].

Схематическое изображение ячейки электролизера с протонообменной мембраной представлено на рисунке 2.

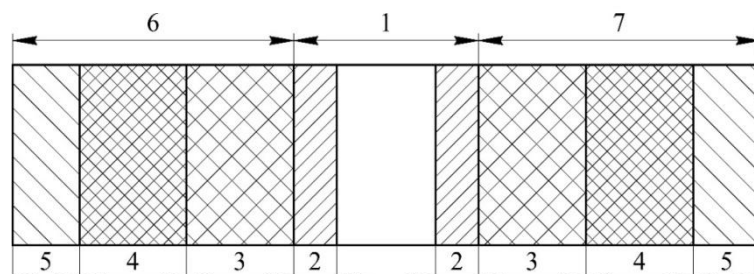


Рис. 2. Схематическое изображение ячейки электролизера с протонообменной мембраной: 1 – мембранная электродная сборка; 2 – слои катализаторов; 3 – пористые транспортные слои; 4 – прокладки и ограничители потока; 5 – концевые пластины-токоприемники; 6 – катодный отсек; 7 – анодный отсек

Fig. 2. Schematic representation of an electrolyzer cell with a proton exchange membrane: 1 – membrane electrode assembly; 2 – catalyst layers; 3 – porous transport layers; 4 – gaskets and flow limiters; 5 – end plates-pantographs; 6 – cathodic compartment; 7 – anode compartment

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Реализации высокого давления способствует использование армированной твердополимерной мембраны, работающей при высоких перепадах давления между анодным и катодным отсеками. Необходимо упомянуть тот факт, что эффективность электролиза в таком случае несколько снижается из-за увеличения омического сопротивления мембраны [15].

Напряжение, необходимое для электрохимического разложения воды в ячейке электролизера под давлением, описывается уравнением Нернста [7]:

$$U = E_a - E_k = E_0 + \frac{RT}{2F} \ln \left(\frac{p_{H_2} S_{H_2} \sqrt{p_{O_2} S_{O_2}}}{\sqrt{c_0^3}} \right)$$

где E_a, E_k – электрические потенциалы на аноде и катоде соответственно, В; E_0 – электрический потенциал, соответствующий обратимому напряжению разложения воды в стандартных условиях, В; R – универсальная газовая постоянная, Дж/(моль·К); T – температура, К; F – постоянная Фарадея, Кл/моль; p_{H_2}, p_{O_2} – парциальное давление водорода и кислорода соответственно, бар; S_{H_2}, S_{O_2} – растворимости водорода и кислорода соответственно, моль/(см³·бар); c_0 – стандартная эталонная концентрация водорода и кислорода в воде, моль/л.

Растворимость газа в мембране связывает коэффициент диффузии, проницаемость, а также парциальное давление и концентрацию по закону Генри, характеризующего пропорциональную зависимость между концентрациями растворенных газов и их парциальными давлениями [7]:

$$c = pS = p \frac{\varepsilon}{D}$$

где D – коэффициент диффузии газа, см²/с; ε – проницаемость мембраны, моль/(с·см·бар).

Из представленных уравнений очевидно, что рост давления способствует увеличению растворимости водорода и кислорода, что будет снижать выход по току – отношение количества газа (водорода или кислорода) практически полученного в ячейке электролизера к количеству газа, которое должно образоваться при полном использовании тока [17]. При нормальной работе значение выхода по току составляет 98 %. Таким образом, с целью компенсации снижения выхода по току необходимо увеличение удельного расхода электроэнергии по мере роста давления.

Принципы обеспечения высокого давления электролиза

В ходе комплексного анализа работ, посвященных электролизу воды с использованием протонообменной мембраны, в том числе [15, 18], возможно выделить три способа обеспечения высокого давления вырабатываемого водорода:

1) деионизированная вода при атмосферном давлении подается непосредственно в анодный отсек электролизера, электролиз производится при атмосферном давлении. На аноде вырабатывается кислород. Водород, образующийся на катодной стороне ячейки, подается на механическое многоступенчатое компримирование для нагнетания давления необходимого значения;

2) деионизированная вода подается в анодный отсек за счет насоса высокого давления для обеспечения необходимого давления вырабатываемых в процессе электролиза газов, равного давлению исходной воды. Такой тип работы электролизной установки называется сбалансированным или симметричным;

3) деионизированная вода поступает в электролизер на анодной отсек при атмосферном давлении. На катодной стороне, за счет непроницаемости мембраны, генерируется с постепенным повышением давления водород, что избавляет от необходимости подавать воду под давлением и исключает внедрение компрессорных машин. Данный тип работы электролизера называется дифференциальным или асимметричным, разность давлений между отсеками ячейки ограничена способностью мембраны противостоять возникающим механическим напряжениям [19, 20].

Стоит отметить, что в первом и третьем способах давление кислорода поддерживается в условиях атмосферного.

Принципиальные схемы электролизных установок высокого давления, основанные на данных патентов на изобретение [21, 22], по второму и третьему способам нагнетания отражены на рисунках 3 и 4 соответственно.

К заполненному водой блоку электролизных ячеек 1 подается напряжение постоянного тока – организуется процесс электролиза воды, при котором на анодах выделяется кислород, а на катодах – водород. Образующиеся газы вместе с уносимой частью воды отводятся в газоотделители водорода 2 и кислорода 3, где происходит механическое отделение газов от воды. Через патрубки 4 и 5 реализуется отвод водорода и кислорода соответственно в емкостную систему хранения высокого давления. Из

газоотделителей вода через краны-регуляторы 6 дросселируется до давления, близкого к атмосферному, в сепаратор 7, где из нее выделяются растворенные водород и кислород, удаляемые через краны газовой продувки 8 с использованием нейтрального газа – аргона или азота. Для компенсации разложившейся в электролизере воды в сепаратор 7 необходимо добавлять воду из емкости 10 с помощью насоса 11. Предварительно добавочная вода подводится в емкость 10 через патрубок 9. Из сепаратора 7 воды подается насосом высокого давления 12 на электролиз. Конструкционно блок ячеек находится в герметичном кожухе, который расположен в жестком корпусе электролизера. С целью выравнивания давления между электролизными ячейками осуществляется подача жидкости противодавления из емкости 13 насосом высокого давления 14 во внутренний объем жесткого корпуса установки. Давление жидкости поддерживается эквивалентным рабочему давлению процесса электролиза.

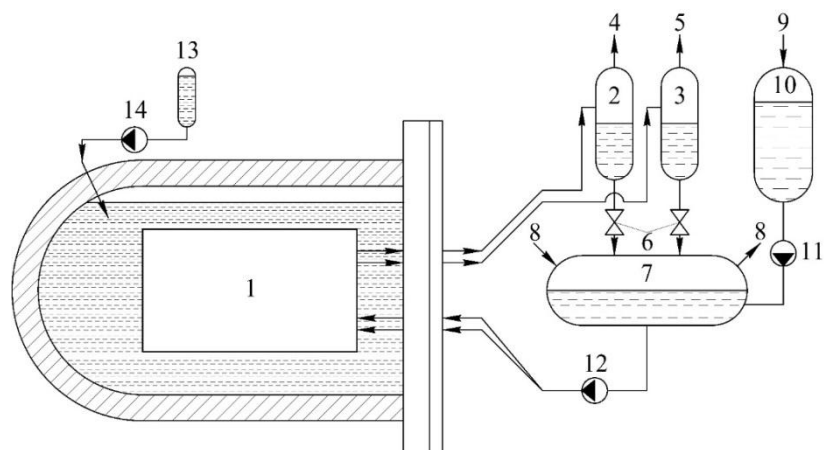


Рис. 3. Принципиальная схема электролизной установки высокого давления сбалансированного типа: 1 – блок электролизных ячеек в герметичном кожухе; 2, 3 – газоотделители водорода и кислорода соответственно; 4, 5 – отвод газообразных водорода и кислорода соответственно; 6 – краны-регуляторы; 7 – сепаратор деионизированной воды; 8 – газовая продувка; 9 – подвод воды; 10 – емкость с водой; 11 – водяной насос; 12, 14 – насосы высокого давления деионизированной воды и жидкости противодавления соответственно; 13 – емкость с жидкостью противодавления

Fig. 3. Schematic diagram of a high-pressure electrolysis unit of balanced type: 1 – block of electrolysis cells in a sealed casing; 2, 3 – hydrogen and oxygen gas separators, respectively; 4, 5 – removal of gaseous hydrogen and oxygen, respectively; 6 – regulator valves; 7 – deionized water separator; 8 – gas purging; 9 – water supply; 10 – container with water; 11 – water pump; 12, 14 – high-pressure pumps of deionized water and back-pressure fluid, respectively; 13 – container with back-pressure fluid

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

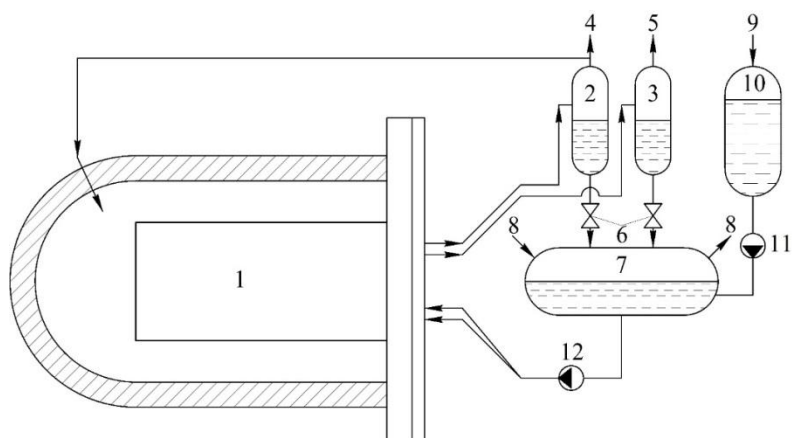


Рис. 4. Принципиальная схема электролизной установки высокого давления дифференциального типа: 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11 – то же, что на рис. 3; 12 – насос подачи деионизированной воды в блок электролизных ячеек

Fig. 4. Schematic diagram of a differential type high-pressure electrolysis unit: 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11 – the same as in Fig. 3; 12 – pump for feeding deionized water into the electrolysis cell unit

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Представленный на рисунке 4 вариант электролизной установки высокого давления отличается от электролизера со сбалансированным давлением тем, что воды подается насосом 12 в анодный отсек блока электролизных ячеек с давлением, равным атмосферному.

Водород вырабатывается в процессе электролиза при давлении, которое может превышать уровень давления в корпусе, поэтому не требуется промежуточного сжатия газа для нагнетания давления в корпусе. По меньшей мере часть водорода, получаемого под давлением из пакета ячеек, используется для создания давления внутри жесткого корпуса высокого давления.

Использование в качестве создающей давление среды самого газа, вырабатываемого в процессе электролиза, имеет следующие преимущества:

- 1) не требуется дополнительных компрессорных установок и насосов высокого давления;
- 2) с момента начала процесса электролиза при низком давлении вплоть до конечного рабочего давления повышение давления газа в корпусе высокого давления электролизера происходит пропорционально нарастанию давления процесса электролиза;
- 3) обеспечивается электрическая газовая изоляция и снижается риск потерь мощности или короткого замыкания, вызванных утечкой воды.

При дифференциальном типе работы РЕМ-электролизера высокое давление поддерживается на катодной стороне, где производится выработка водорода, анодная же сторона находится под атмосферным. В таком случае, в результате повышения рабочего давления только на катодной стороне, создается риск, связанный с опасностью нарушения герметичности мембраны, что вызовет образование гремучей смеси.

Сбалансированный тип работы электролизной установки характеризуется равным давлением как со стороны катода, так и со стороны анода. Мембрана, прокладки и пористый транспортный слой имеют меньшую толщину с учетом более низких требований к механической прочности при сравнении с дифференциальным типом, так как нагрузки, оказываемые с катодной и анодной стороны, уравниваются друг друга.

Первый способ нагнетания давления вырабатываемого водорода имеет недостаток за счет сжатия в многоступенчатых компрессорных установках и связанных с этим больших затрат энергии.

Отрицательной характеристикой второго механизма нагнетания высокого давления является потребность в дополнительной энергии, необходимой для генерации кислорода при повышенном давлении.

При увеличении давления производимого водорода с использованием третьего механизма характерное влияние на эффективность и производительность электролизера оказывает явление перекрестного проникновения газов, увеличивающее общую удельную потребность в энергии, согласно уравнению Нэрнста [18].

В настоящей работе особо приняты во внимание исследования, в которых рассматриваются физико-химические явления и проблемы, связанные с повышением давления электролиза.

Одним из таких процессов является перекрестное проникновение, т.е., взаимное проникновение водорода и кислорода через мембрану. Это явление зависит от разницы парциального давления между каналами потока на катодной и анодной стороне, а также от растворимости и диффузии через мембрану. При этом проникновение водорода более вероятно вследствие более высокой диффузионной способности [23].

Кроме того, молекулы воды гидратируют ионы и переносятся через мембрану (электроосмос [24, 25]), что приводит к рекомбинации кислорода и водорода на поверхности электрода и снижает выход по току [15].

В работах [14, 26, 27] показано, что разница давлений между катодным и анодным отсеками создает диффузионный градиент. Скорость перекрестного проникновения газов через мембрану и их растворимость в воде увеличиваются с повышением давления, в результате чего растет концентрация водорода и кислорода в анодном и катодном отсеках соответственно, что может привести к образованию взрывоопасной смеси.

В исследовании [23] анализируется одномерная динамическая модель системы электролиза воды высокого давления, по результатам расчета которой получены объемные доли водорода на анодной стороне ячейки в зависимости от катодного давления, имеющего значения 3, 30 и 100 бар, а также проанализировано влияние плотности тока на объемное содержание водорода при постоянном давлении 100 бар. Для 3 и 30 бар объемная доля водорода не превышает 0,5%, в то время как для 100 бар она изменяется в диапазоне 2,5...3%. При средних плотностях тока со значениями 0,7, 1 и 1,3 А/см² объемное

содержание водорода не достигает взрывоопасного предела, но при плотности тока, равной $0,4 \text{ Асм}^{-2}$, это предел превышен в среднем в 1,5 раза.

Исходя из данных работы [7] известно, что в результате моделирования содержание водорода в анодном отсеке ячейки электролизера при сбалансированном давлении 30 бар и дифференциальном давлении, где на катодной стороне реализуется 30 бар, а на анодной – 1 бар, в зависимости от плотности тока и толщины мембраны в диапазонах до 2 А/см^2 и 50...300 мкм, соответственно, получены следующие сведения: при любой плотности тока объемное содержание водорода на анодной стороне электролизера с толщиной мембраны 50 мкм составляет более 5%, для мембран с толщинами 100 и 150 мкм при сбалансированном давлении содержание водорода менее 4% наблюдается в диапазоне $1,5...2 \text{ А/см}^2$, тогда как при дифференциальном давлении такой результат достигается при 2 А/см^2 . Объемное содержание водорода ниже 4% для мембран с толщинами в диапазоне 200...300 мкм достигается при сбалансированном давлении при плотностях тока от $0,75 \text{ А/см}^2$, при дифференциальном давлении плотности тока составляют от 1 А/см^2 . По оценкам проведенной работы [7], при сбалансированном давлении перекрестное проникновение водорода примерно на треть меньше по сравнению с дифференциальным давлением.

По данным работы [26], на электроосмотический перенос воды существенно влияет только плотность тока. Потери электроэнергии в ячейках оказываются относительно небольшими при низких плотностях тока, поэтому КПД системы снижается при высоких ее значениях. С другой стороны, низкая плотность тока нецелесообразна, поскольку скорость производства водорода на ячейке будет относительно низкой [16]. Процесс электролиза при высоком давлении, слабом токе и низкой скорости подачи воды увеличивает концентрацию водорода в анодном канале и может быть опасным. Резкие изменения рабочих параметров, такие как снижение плотности тока или увеличение расхода воды, могут привести к росту концентрации водорода в анодном отсеке ячейки [23].

Поскольку проникающая способность у водорода больше, чем у кислорода, то риск возникновения гремучей смеси в анодном отсеке наиболее высок. Для предотвращения таких рисков предложены следующие методы:

- химическая модификация перфторированной твердополимерной мембраны посредством использования цирконилфосфата или полиэфиркетонов в качестве добавочного компонента для уменьшения явления перекрестного проникновения, движущей силой которого является разница химического потенциала между анодным и катодным отсеками ячейки. Внедряемые добавочные компоненты используются вследствие их высокой химической и термической стабильности, механической прочности. Вне зависимости от метода сульфирования всегда необходима оптимизация содержания сульфогрупп в полимере, поскольку, с одной стороны, увеличение их количества повышает протонную проводимость мембраны, но, с другой стороны, увеличивает растворимость полимера в воде и степень набухания мембраны, что ухудшает ее механические характеристики [28];

- внедрение каталитических газовых рекомбинаторов для поддержания концентраций водорода и кислорода на анодном и катодном участках ячейки соответственно в значениях, совместимых с требованиями безопасности. Такое решение способствует гетерогенной рекомбинации газообразных водорода и кислорода на поверхности катализаторов. Каталитический рекомбинатор может быть размещен снаружи, в пористом транспортном слое, в слое катализатора или в мембране [29]. Известно, что при использовании внешнего рекомбинатора необходимо предварительно высушить газ, что характеризует трудности в исполнении такого метода. Предложено внедрение внутреннего каталитического рекомбинатора, представленного прослойкой из наночастиц платины, вводимых в электролизер посредством напыления. Содержание водорода в кислороде в анодном отсеке значительно снижается при внедрении рекомбинационной прослойки в МЭС по сравнению со стандартными МЭС без прослойки. За 245 часов выявлено лишь незначительное увеличение содержания водорода в кислороде – ниже $140 \cdot 10^{-6} \text{ об.}\% \cdot \text{ч}^{-1}$, тогда как для стандартных МЭС наблюдалось более сильное увеличение – выше $1250 \cdot 10^{-6} \text{ об.}\% \cdot \text{ч}^{-1}$. Более того, долгосрочные эксперименты не показали увеличения скорости разложения мембраны с прослойкой по сравнению со стандартной мембраной [29];

- утолщение твердополимерной мембраны – скорость проникновения водорода быстро увеличивается с ростом катодного давления, что можно уменьшить за счет увеличения толщины мембраны [8], в результате чего при высоких давлениях водорода во время электролиза наблюдаются меньшие его концентрации в анодном отсеке. Однако более толстые мембраны имеют повышенное омическое сопротивление, что снижает эффективность электролиза по напряжению [7]. То есть увеличение давления газа внутри

отсека ячейки приводит к росту потребления энергии во время электролиза. Такое снижение эффективности частично компенсируется уменьшением размеров газовых пузырьков и снижением газовых экранирующих эффектов на поверхности электродов, что в противном случае увеличивало бы сопротивление воды и ограничило бы плотность тока [7]. Отсюда следует, что на энергопотребление электролизера высокого давления характерно влияет толщина мембраны.

Современные достижения в области разработок и испытаний различных прототипов PEM-электролизеров высокого давления

Среди последних разработок в области электролиза воды высокого давления известна работа [30], в которой была разработана динамическая модель электролизера с протонообменной мембраной дифференциального типа с высоким катодным рабочим давлением в условиях калибровки по экспериментальным данным, полученным на PEM-электролизере (PEM – proton-exchange membrane) мощностью 5,6 кВт. Результаты показали сходимость расчетных и эмпирических данных при росте давления процесса до 70 бар.

В работе [31] проведена технико-экономическая оценка систем электролиза воды высокого давления в диапазоне 70...80 бар с использованием протонообменной мембраны и в условиях сравнения с системами, работающими при 30 бар с применением компримирования. Приведенные результаты свидетельствуют возможности достижения экономической целесообразности использования электролизеров систем PEMEL высокого давления, работающих на высоком и сверхвысоком давлениях, отвечающих требованиям существующих и будущих промышленных предприятий.

В работе [32] изучено явление перекрестного проникновения газов сквозь твердополимерную мембрану в PEM-электролизерах высокого давления, поскольку оно воздействует на энергопотребление и безопасность эксплуатации установки. Также необходимы измерения перехода водорода при фактических рабочих температурах и давлении. Рабочие давления составляют 11,3 и 0,1 МПа на катодной и анодной стороне соответственно. При плотности тока 0,4 А/см² была оценена деградация поверхности электродов до и после экспериментов с высоким давлением. В качестве результатов получено, что необратимая пластическая деформация и возможная адсорбция примесей на поверхности слоя анодного катализатора приводят к значительному ухудшению производительности.

В мировой практике имеется реальный опыт испытаний различных прототипов PEM-электролизеров высокого давления.

В ходе проекта GenHyPEM, исследовательской программы по изучению электролиза воды под высоким давлением с использованием твердополимерной протонообменной мембраны, проводились эксперименты с использованием электролизной установки высокого давления, предназначенной для работы в условиях диапазона давлений до 130 бар при температурах до 90 °С. Электролизер GenHy1000, созданный в рамках проекта GenHyPEM, расположен в Парижском университете. Насосы высокого давления используются для нагнетания и циркуляции воды как в анодном, так и в катодном отсеках. Получены значения чистоты водорода и выхода по току, показывающие, что уровень загрязнения водорода кислородом может быть значительно высоким, даже при использовании толстых мембран. Результаты показали, что объемное содержание кислорода в водороде при давлении 130 бар может достигать 2,66 об.%, что находится ниже предела воспламеняемости водород-кислородных смесей, но даже в этих условиях необходимо обеспечивать меры безопасности для предотвращения аварийных ситуаций [33].

Построенный и введенный в эксплуатацию в Австрии электролизер Wind2Hydrogen спроектирован как модульный дифференциальный PEM-электролизер воды высокого давления мощностью более 100 кВт, оснащен двенадцатью отдельными управляемыми модулями производства Fronius International GmbH. На основе экспериментальных исследований на модуле мощностью 9,6 кВт определены эмпирические параметры, измерения проводились при давлениях в диапазоне 70...155 бар и температурах 45...75 °С с плотностями тока 0,81...1,85 А/см². Проанализированы эффективность ячейки и диффузия водорода от катода к аноду. КПД электролизной ячейки, равный 74,8%, был достигнут при параметрах 0,81 А/см², 75 °С и 155 бар. Получено, что эффективность ячейки и общий КПД уменьшаются с увеличением давления, снижение температуры на 30 °С снижает эффективность больше, чем увеличение давления с 70 до 155 бар [26].

Прототип электролизера высокого давления в работе [20] был изготовлен компанией Giner Inc., испытания проводились в рамках итальянского проекта FISIR. Особенностью прототипа является дифференциальное давление на мембране: в анодных отсеках

поддерживается атмосферное давление, а в катодных оно достигает 7 МПа. Испытания проводились при 7 различных давлениях в диапазоне 1...7 МПа, и температурах 40, 48 и 55 °С. Получено, что повышение температуры от 40 °С до 55 °С приводит к снижению напряжения на 70 мВ при давлении 1 МПа и на 100 мВ при давлении 7 МПа, увеличение давления с 1 до 7 МПа вызывает повышение напряжения на 130 мВ при температуре 40°С и на 100 мВ при 55°С.

В России наибольших успехов в исследовании процессов электролиза и создании электролизеров с твердополимерной мембраной достигли в НИЦ «Курчатовский институт» в кооперации с ФГУП «Красная Звезда» и НИУ «МЭИ»: разработаны электролизные установки с производительностью до 10 нм³/ч, организовано мелкосерийное производство некоторых типов электролизеров различного назначения. Установки электролиза высокого давления, разработанные НИЦ «Курчатовский институт» возможно использовать для зарядки газовых баллонов с эксплуатационным давлением до 200 бар, что позволяет исключить наиболее энергоемкую первую ступень сжатия газа в многоступенчатых механических водородных компрессорах [34].

Коммерчески доступные крупномасштабные системы электролиза на мировом рынке представлены компаниями Siemens – Германия, NEL – Норвегия, Proton Onsite и Giner – США, Hydrogenics – Канада, ITM-Power – Великобритания, AREVAH2Gen – Франция [15].

В работе [35] отмечается, что с ростом рабочего давления процесса электролиза увеличивается давление производимого водорода (и кислорода), что позволяет отказаться от многоступенчатого сжатия в компрессорных установках, требующих значительных затрат электроэнергии, что отражает перспективность подхода с точки зрения снижения стоимости вырабатываемого водорода. Такое решение позволяет повысить общую эффективность водородного комплекса.

Для щелочных электролизеров рабочие давления свыше 100...200 бар менее распространены, чем для PEM-электролизеров, но разработка такого оборудования активно ведется в том числе вследствие допустимости температур более 200°С, что, в свою очередь, позволяет достигать высоких значений КПД в условиях отсутствия деградации селективной мембраны. В работе [36] представлено аналитическое изучение влияния температуры и давления на щелочной электролиз. Отмечается, что при повышении температуры или давления обратимое напряжение электролиза уменьшается, при этом перенапряжение снижается с повышением температуры и практически не зависит от давления. В условиях теоретической оценки КПД электролиза при 350 °С и 100 бар увеличивается примерно на 17% в сравнении со значением КПД при 80 °С и 1 бар.

Методические положения оценки эффективности комбинирования АЭС с водородным комплексом на основе электролиза воды высокого давления

Выявленные факторы необходимо принять во внимание при разработке и обосновании водородного комплекса высокого давления в комбинировании с АЭС с точки зрения безопасности работы электролизной установки. Приведенный подробный анализ исследуемых работ позволяет основательно подойти к оценке зависимостей рабочих параметров процесса электролиза с учетом явления перекрестного проникновения.

Как было отмечено выше, с ростом рабочего давления КПД электролиза уменьшается вследствие снижения выхода по току за счет интенсификации явления перекрестного проникновения газов сквозь твердополимерную мембрану. Это приводит к некоторому снижению количества вырабатываемого водорода и кислорода, что в итоге вызывает соответствующее некоторое снижение относительного внутреннего КПД турбины по сравнению с вариантом при использовании компрессорных машин. В дальнейших расчетах принимается среднее значение КПД электролиза высокого давления с учетом влияния инерционности процесса снижения выхода по току.

В этих условиях целесообразно произвести оценку влияния исследуемого явления перекрестного проникновения газов на термодинамическую эффективность комбинирования АЭС с водородным комплексом высокого давления с точки зрения преобразования провальной мощности в пиковую и итогового значения КПД АЭС брутто при реализации перегрева свежего пара на входе в голову турбины, в том числе в условиях сравнения с системой водородного комплекса с использованием компрессорных машин.

Главным преимуществом схемы на рисунке 1б является существенное увеличение вероятности безотказной работы водородного комплекса в целом, а также, по итогам выполненных оценок, стоимость резерва для водородного комплекса высокого давления оказывается относительно меньшей [4].

На примере комбинирования АЭС с ВВЭР-1200 с водородным комплексом на основе электролиза воды высокого давления выполнена сравнительная оценка эффективности

преобразования провальной мощности в пиковую на основании математико-термодинамической модели развернутой тепловой схемы ПТУ АЭС [37] согласно рисунку 16.

Коэффициент эффективности преобразования в пиковую мощность оценивался по выражению:

$$\eta_{\text{пров}1k} = \eta_{\text{эу}}(1 - \alpha)\eta_{\text{компр}1}\eta_{\text{компр}2}\eta_{oi}\eta_{\text{эг}}\eta_{\text{мех}},$$

$$\eta_{\text{пров}2j,k} = \eta_{\text{эу}j}(1 - \alpha)\psi\eta_{oi}\eta_{\text{эг}}\eta_{\text{мех}},$$

при этом

$$\eta_{\text{эу}j} = 71,736 - 1,995 \ln p_j,$$

где $\eta_{\text{пров}1k}$, $\eta_{\text{пров}2j,k}$ – коэффициент эффективности преобразования провальной мощности в пиковую (КЭП) для водородного комплекса с использованием компрессорных установок и высокого давления соответственно; k, j – в зависимости от величины используемой провальной мощности и рабочего давления процесса электролиза, соответственно; $\eta_{\text{эу}}$, $\eta_{\text{эу}j}$ – КПД электролизной установки для водородного комплекса с компрессорными машинами и высокого давления, полученное на основании номограммы на рисунке 5, соответственно; p_j – рабочее давление процесса электролиза; η_{oi} – относительный внутренний КПД турбины К-1200-6,8/3000 с учетом перегрева свежего пара; $\eta_{\text{компр}1}$, $\eta_{\text{компр}2}$ – КПД газового поршневого компрессора при зарядке и разрядке соответственно; $\eta_{\text{эг}}$ – КПД электрогенератора; $\eta_{\text{мех}}$ – КПД механической передачи турбоагрегата; α – коэффициент учета затрат мощности на собственные нужды электролизной установки (принят равным 5%); ψ – коэффициент учета потерь полезной мощности в цикле в результате дросселирования.

Отношение выработанной пиковой электроэнергии АЭС нетто с использованием паро-водородного перегрева к потребляемой провальной электроэнергии для выработки водорода и кислорода характеризует коэффициент преобразования провальной мощности в пиковую:

$$\eta_{\text{пров}} = \frac{N_{\text{АЭС(н)}}^{\text{пик}} \tau_{\text{пик}}}{N_{\text{пров}} \tau_{\text{пров}}},$$

где $N_{\text{АЭС(н)}}^{\text{пик}}$ – пиковая мощность АЭС нетто (за вычетом электрической мощности компрессорных машин); МВт; $\tau_{\text{пик}}$, $\tau_{\text{пров}}$ – период пика и периода провала электрической нагрузки, соответственно, в энергосистеме, ч/сут; $N_{\text{пров}}$ – используемая провальная мощность, МВт.

На основании имеющихся данных, а также при использовании программного обеспечения [37], были получены значения КПД АЭС брутто для исследуемых водородных комплексов в условиях дифференцирования по провальной мощности. Определение КПД АЭС брутто производится в соответствии со следующей формулой:

$$\eta_{\text{АЭС}}^{\text{бр}} = \frac{N_{\text{АЭС}+Q_{\text{H}_2}}}{Q_{\text{p}} + Q_{\text{H}_2}},$$

где $N_{\text{АЭС}+Q_{\text{H}_2}}$ – электрическая мощность энергоблока АЭС с учетом подведенной теплоты водорода в паротурбинном цикле, МВт; Q_{p} – тепловая мощность реактора в номинальном режиме, МВт; Q_{H_2} – теплота, подведенная при сжигании водорода в среде кислорода, МВт.

Результаты и обсуждение (Results and discussions)

Исходя из анализа представленных данных по источникам [7, 8, 14-16, 18, 20, 23, 26, 27, 33, 36, 38, 39] составлены графические зависимости параметров процесса электролиза воды от рабочего давления. Результаты представлены на рисунках 5-6.

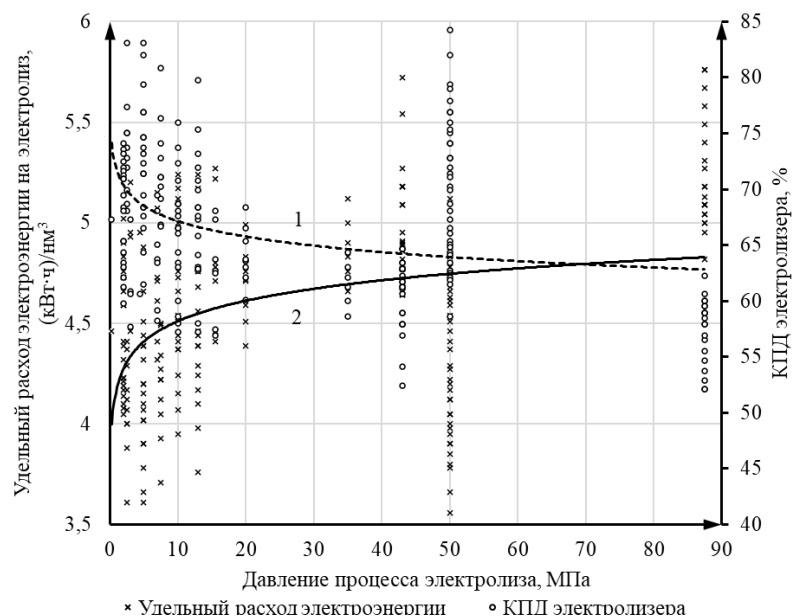


Рис. 5. Номограмма зависимости удельного расхода электроэнергии на выработку водорода и КПД электролизера от давления: 1, 2 – линии тренда КПД электролизера и удельного расхода электроэнергии на производство водорода, соответственно

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Очевидно, что эффективность электролиза несколько снижается с увеличением давления процесса в соответствии с уравнением Нернста, приведенным выше.

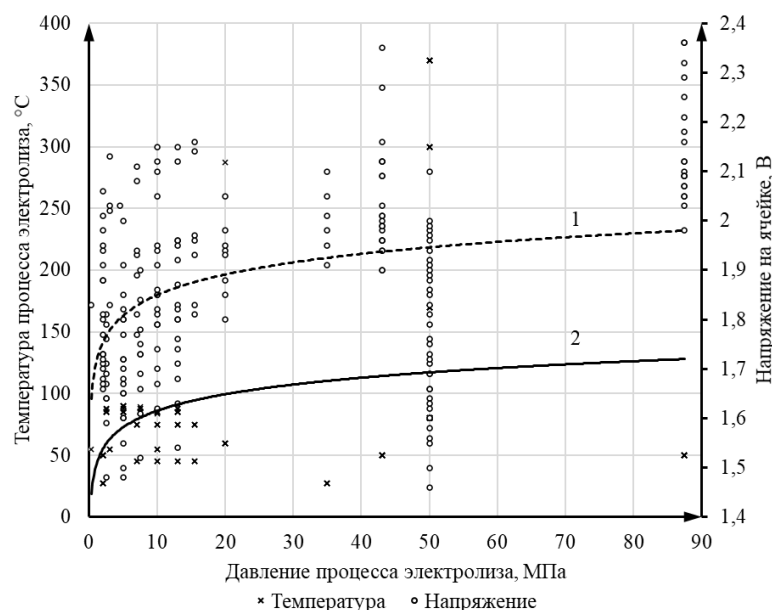


Рис. 6. Номограмма зависимости температуры и напряжения на ячейке от давления: 1, 2 – линии тренда напряжения на ячейке и температуры процесса электролиза соответственно

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Из представленных зависимостей видно, что с повышением давления необходимо увеличение температуры рабочего процесса. При этом зависимости 2 на рисунке 5 соответствует аналогичная зависимость 2 на рисунке 6.

Дополнительно представлена зависимость удельного расхода электроэнергии и КПД электролизера от рабочей температуры процесса электролиза воды исследуемого диапазона высоких давлений на рисунке 7.

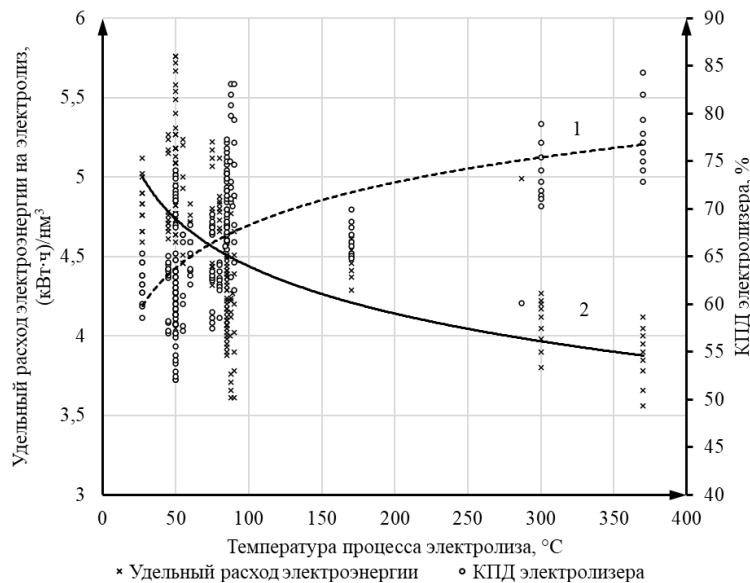


Рис. 7. Номограмма зависимости удельного расхода электроэнергии на выработку водорода и КПД электролизера от температуры: 1, 2 – линии тренда КПД электролиза и удельного расхода электроэнергии на производство водорода соответственно

Fig. 7. Nomogram of the dependence of the specific electricity consumption for hydrogen production and the efficiency of the electrolyser on the temperature: 1, 2 – trend lines of the electrolysis efficiency and specific electricity consumption for hydrogen production, respectively

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Увеличение рабочей температуры повышает эффективность процесса электролиза, в то время как увеличение давления приводит к снижению КПД электролизной установки. Таким образом, можно утверждать о нивелировании снижения КПД электролиза за счет роста температуры процесса.

Следует отметить, что на представленных номограммах область значений при температуре свыше 200 °С показана для щелочного электролиза высокого давления [36]. Для РЕМ-электролизеров в указанном диапазоне температур интенсифицируется процесс деградации твердополимерной мембраны с последующим разрушением.

Резюмируя вышесказанное, влияние высокого давления на процесс электролиза характеризуется рядом явлений, совокупность которых отражена в результирующем факторе воздействия перекрестного проникновения газов сквозь твердополимерную мембрану, что ведет за собой риск образования взрывоопасной смеси по причине превышения минимально допустимой предельной концентрации водорода в смеси с кислородом. Известные методы снижения перекрестного проникновения газов способствуют обеспечению безопасной эксплуатации оборудования в том числе с использованием высоких давлений в процессе электролиза.

Используемые исходные данные занесены в таблицу 1. Результаты сравнения отражены на рисунке 8, из которых очевидно преимущество водородного комплекса высокого давления по сравнению с компрессорной схемой: эффективность преобразования в пиковую мощность больше аналогичного параметра водородного комплекса с компрессорными машинами в 1,003...1,039 раза для диапазона давлений 80...10 МПа соответственно, исключая значения КЭП при 790 МВт провальной мощности при давлениях 50 и 80 МПа, для которых этот параметр либо равен, либо меньше соответствующего значения КЭП для компрессорной схемы.

При проведении расчетов дополнительно были учтены потери мощности вследствие роста производительности циркуляционных насосов в условиях увеличения расхода рабочего тела при паро-водородном перегреве. В зависимости от используемой провальной мощности 790...900...1200 МВт для компрессорной схемы этот параметр составляет 4...5...6 % соответственно. В случае схемы с электролизерами высокого давления учтены потери полезной мощности от дросселирования.

Таблица 1
Table 1

Исходные данные к определению коэффициента эффективности преобразования провальной мощности в пиковую

Initial data for determining the conversion efficiency coefficient

Используемая провальная мощность, МВт		790...900...1200			
Относительный внутренний КПД турбины с перегревом свежего пара для водородного комплекса с компрессорами η_{oi} , % / Температура перегрева свежего пара, °С		89,19...89,39...89,86 / 396...415...467			
КПД электролизной установки для водородного комплекса с компрессорами $\eta_{эу}$, %		80			
КПД поршневого компрессора $\eta_{компр}$, %		73			
КПД электрогенератора $\eta_{эг}$, %		99			
КПД механической передачи турбоагрегата $\eta_{мех}$, %		98,5			
Коэффициент учета затрат мощности на собственные нужды электролизной установки α , %		5			
Коэффициент учета потерь полезной мощности при дросселировании ψ		0,56...0,57...0,58			
Рабочее давление процесса электролиза p_j , МПа		10	30	50	80
КПД электролизной установки для водородного комплекса высокого давления $\eta_{эу\text{ж}}$, %		73,55	72,5	72	71,5
Относительный внутренний КПД турбины с перегревом свежего пара для водородного комплекса высокого давления η_{oi} , % / Температура перегрева свежего пара, °С	790 МВт	88,481 / 390	88,476 / 389	88,476 / 389	88,391 / 388
	900 МВт	89,334 / 410	89,331 / 408	89,33 / 407	89,329 / 406
	1200 МВт	89,804 / 462	89,802 / 457	89,801 / 455	89,801 / 454

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

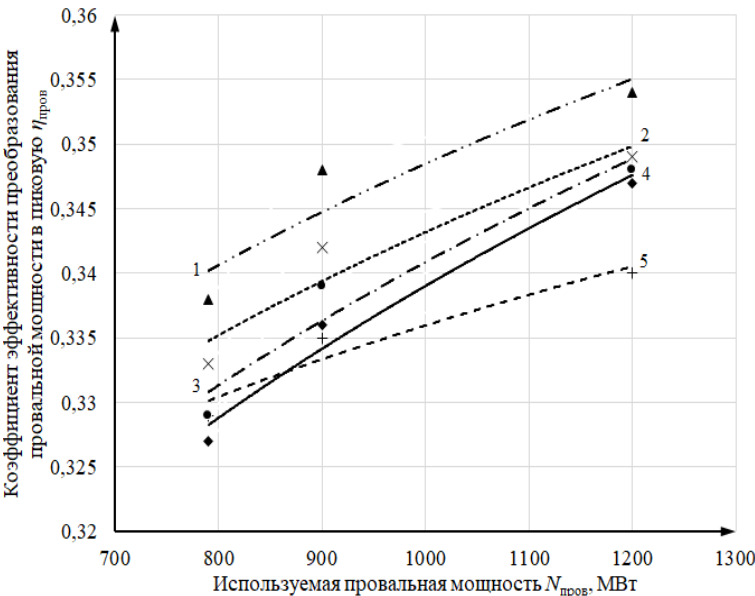


Рис. 8. Эффективность преобразования провальной мощности в пиковую: 1, 2, 3, 4 – для водородного комплекса высокого давления при 10, 30, 50 и 80 МПа соответственно; 5 – для водородного комплекса с использованием компрессорных машин

Fig. 8. Efficiency of conversion of dip power to peak power: 1, 2, 3, 4 – for a high-pressure hydrogen complex at 10, 30, 50 and 80 MPa, respectively; 5 – for a hydrogen complex using compressor machines

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Результаты определения КПД АЭС брутто для исследуемых водородных комплексов низкого и высокого давлений приведены на рисунке 9, из которого видно, что КПД АЭС брутто в результате комбинирования атомной станции с водородным комплексом на основе процесса электролиза воды высокого давления оказывается больше аналогичного параметра для водородного комплекса с компрессорными установками в 1,009...1,019 раза для всего диапазона провальных мощностей с учетом варьирования по давлению аккумулирования 80...10 МПа соответственно.

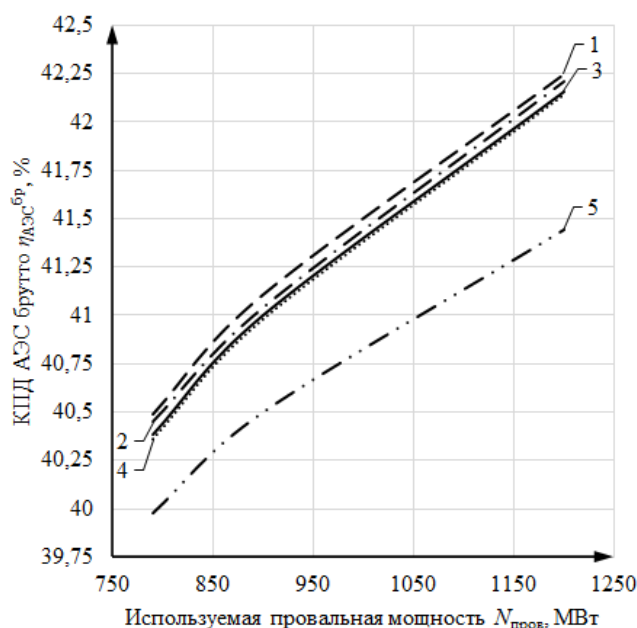


Рис. 9. Графики зависимости КПД АЭС брутто от используемой провальной мощности: 1, 2, 3, 4 – КПД АЭС брутто для водородного комплекса высокого давления при 10, 30, 50 и 80 МПа соответственно; 5 – КПД АЭС брутто для водородного комплекса с использованием компрессорных машин

Fig. 9. Graphs of dependence of NPP gross efficiency on the used power: 1, 2, 3, 4 – NPP gross efficiency for a high-pressure hydrogen complex at 10, 30, 50 and 80 MPa, respectively; 5 – NPP gross efficiency for hydrogen complex using compressor machines

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Выводы (Conclusions)

1) Авторами разработан и запатентован новый принцип комбинирования АЭС с водородным комплексом на основе электролиза воды высокого давления. По оценкам, выполненным ранее, использование электролиза воды высокого давления приводит к заметному повышению вероятности безотказной работы водородного комплекса в целом по сравнению с вариантом при использовании компрессорных машин. В этих условиях обозначается необходимость проведения детального анализа особенностей высокого давления процесса электролиза, что необходимо принимать во внимание в дальнейшем.

2) В настоящее время в мире широким фронтом ведутся работы по всестороннему совершенствованию получения водорода электролизом воды. Одним из направлений является повышение давления процесса, что избавляет от необходимости применения компримирования. На сегодняшний день имеются результаты испытаний и исследований РЕМ-электролизеров в диапазоне давлений до 87,5 МПа. В результате анализа и обобщения мирового опыта, в том числе испытаний прототипов электролизеров и теоретических расчетов составлены оригинальные номограммы зависимости основных параметров электролиза от давления и температуры, из которых очевидно, что рост давления приводит к необходимости увеличения удельного расхода электроэнергии вследствие снижения выхода по току по причине неизбежных потерь водорода и кислорода при взаимной примеси в результате диффузии через мембрану и растворения вырабатываемых газов в воде. Данное обстоятельство, в свою очередь, приводит к некоторому снижению КПД электролиза. Принимая во внимание результаты расчета коэффициента эффективности преобразования провальной мощности в пиковую и КПД АЭС, хотя увеличение давления электролиза и приводит к снижению КПД процесса, водородный комплекс высокого давления оказывается более эффективным по сравнению с водородным комплексом при использовании компрессорных машин.

Литература

1. Энергетическая стратегия России на период до 2035 г. / Правительство Российской Федерации. – Москва, 2020 г. – 79 с.
2. Егоров А.Н., Байрамов А.Н. Электролиз воды и обратимые топливные элементы – перспективные «зеленые» технологии для водородной энергетики // Энергобезопасность и энергосбережение. 2023. Т.3. №111. С. 23-32.

3. Байрамов А.Н., Макаров Д.А. Водородный комплекс на основе электролиза воды высокого давления для комбинирования с атомной станцией. Патент РФ на изобретение №2821330. 21.06.2024. Бюл. № 18.
4. Байрамов А. Н., Макаров Д. А. Разработка и обоснование нового принципа комбинирования АЭС с водородным комплексом // *Альтернативная энергетика и экология (ISJAEE)*. 2024. Т. 5. №422. С. 30-50.
5. Байрамов А. Н. Разработка научных основ повышения эффективности АЭС при комбинировании с водородным комплексом [Текст]: дис. на соискание ученой степени докт. техн. наук: 05.14.01 / Артем Николаевич Байрамов; науч. конс. Р. З. Аминов. – Саратов, 2022. – 397 с.
6. Аминов Р.З., Байрамов А.Н. Комбинирование водородных энергетических циклов с атомными электростанциями. М.: Наука, 2016. 254с.
7. Schalenbach M., Carmo M., Fritz D.L., et al. Pressurized PEM water electrolysis: Efficiency and gas crossover // *International Journal of Hydrogen Energy*. 2013. Vol. 38, N35. pp. 14921-14933.
8. Dang J., Li Y., Liu B., et al. Design and economic analysis of high-pressure proton exchange membrane electrolysis for renewable energy storage // *International Journal of Hydrogen Energy*. 2023. Vol. 48, N28. pp. 10377-10393.
9. Sethuraman V., Weidner J., Haug A., et al. Hydrogen Peroxide Formation Rates in a PEMFC Anode and Cathode: Effect of Humidity and Temperature // *Journal of The Electrochemical Society*. 2008. Vol. 155, N1.
10. Kopitzke R., Linkous C., Anderson R., et al. Conductivity and Water Uptake of Aromatic-Based Proton Exchange Membrane Electrolytes // *Journal of The Electrochemical Society*. 2000. Vol. 147, N5. pp. 1677-1681.
11. Slade S., Campbell S., Ralph T., et al. Ionic Conductivity of an Extruded Nafion 1100 EW Series of Membranes // *Journal of The Electrochemical Society*. 2002. Vol. 149, N12. pp. 1556-1564.
12. Silva R., Francesco M., Pozio A. Tangential and normal conductivities of Nafion® membranes used in polymer electrolyte fuel cells // *Journal of Power Sources*. 2004. Vol. 134, N1. pp. 18-26.
13. LaConti A., Liu H., Mittelsteadt C. Polymer electrolyte membrane degradation mechanisms in fuel cells – findings over the past 30 years and comparison with electrolyzers // *ECS Transactions*. 2006. Vol. 1, N8. pp. 199-219.
14. Millet P., Ngameni R., Grigoriev SA, et al. PEM water electrolyzers: From electrocatalysis to stack development // *International Journal of Hydrogen Energy*. 2009. Vol 35, N10. pp. 5043-5052.
15. Grigoriev SA, Fateev VN, Bessarabov DG, et al. Current status, research trends, and challenges in water electrolysis science and technology // *International Journal of Hydrogen Energy*. 2020. Vol. 45, N49. pp. 26036-26058.
16. Yigit T., Selamet O. Mathematical modeling and dynamic Simulink simulation of high-pressure PEM electrolyzer system // *International Journal of Hydrogen Energy*. 2016. Vol. 41, N32. pp. 13901-13914.
17. Якименко Л. М., Модылевская И.Д., Ткачек З.А. Электролиз воды. М.: Химия, 1970. 263с.
18. Bensmann B., Hanke-Rauschenbach R., Arias I., et al. Energetic evaluation of high pressure PEM electrolyzer systems for intermediate storage of renewable energies // *Electrochimica Acta*. 2013. Vol. 110. pp. 570-580.
19. Degiorgis L., Santarelli M., Cali M. Hydrogen from renewable energy: A pilot plant for thermal production and mobility // *Journal of Power Sources*. 2007. Vol. 171, N1. pp. 237-246.
20. Marangio F., Santarelli M., Cali M. Theoretical model and experimental analysis of a high pressure PEM water electrolyser for hydrogen production // *International Journal of Hydrogen Energy*. 2009. Vol. 34, N3. pp. 1143-1158.
21. Волощенко Г.Н., Порембский В.И. Электролизная установка высокого давления. Патент РФ на изобретение №2660902. 11.07.2018. Бюл. № 20.
22. Съоли Д. Электролизер высокого давления. Патент РФ на изобретение №2496918. 27.10.2013 Бюл. № 30.
23. Kim H., Park M., Lee K. One-dimensional dynamic modeling of a high-pressure water electrolysis system for hydrogen production // *International Journal of Hydrogen Energy*. 2013. Vol. 38, N6. pp. 2596-2609.
24. Ito H., Maeda T., Nakano A., et al. Properties of Nafion membranes under PEM water electrolysis conditions // *International Journal of Hydrogen Energy*. 2011. Vol. 36, N17. pp. 10527-10540.
25. Zawodzinski T., Davey J., Valerio J., et al. The water content dependence of electro-osmotic drag in proton-conducting polymer electrolytes // *Electrochimica Acta*. 1995. Vol. 40, N3. pp. 297-302.
26. Sartory M., Wallnöfer-Ogris E., Salman P., et al. Theoretical and experimental analysis of an asymmetric high pressure PEM water electrolyser up to 155 bar // *International Journal of Hydrogen Energy*. 2017. Vol. 42, N52. pp. 30493-30508.

27. Grigoriev SA, Millet P., Korobtsev SV, et al. Hydrogen safety aspects related to high-pressure polymer electrolyte membrane water electrolysis // *International Journal of Hydrogen Energy*. 2009. Vol. 34, N14. pp. 5986-5991.
28. Добровольский Ю.А., Волков Е.В., Писарева А.В., и др. Протонообменные мембраны для водородно-воздушных топливных элементов // *Российский химический журнал (Журнал Российского химического общества им. Д. И. Менделеева)*. 2006. Т. 1. №6. С. 95-104.
29. Klose C., Trinke P., Böhm T., et al. Membrane Interlayer with Pt Recombination Particles for Reduction of the Anodic Hydrogen Content in PEM Water Electrolysis // *Journal of The Electrochemical Society*. 2018. Vol. 165, N16.
30. Correa G., Marocco P., Muñoz P., et al. Pressurized PEM water electrolysis: Dynamic modelling focusing on the cathode side // *International Journal of Hydrogen Energy*. 2022. Vol. 47, N7. pp. 4315-4327.
31. Hancke R., Holm T., Ulleberg O. The case for high-pressure PEM water electrolysis // *Energy Conversion and Management*. 2022. Vol. 261, N115642.
32. Dang J., Zhang J., Deng X., et al. Hydrogen crossover measurement and durability assessment of high-pressure proton exchange membrane electrolyzer // *Journal of Power Sources*. 2023. Vol. 563, N232776.
33. Grigoriev SA, Poremskiy VI, Korobtsev SV, et al. High-pressure PEM water electrolysis and corresponding safety issues // *International Journal of Hydrogen Energy*. 2011. Vol. 36, N3. pp. 2721-2728.
34. Кулешов Н.В., Григорьев С.А., Кулешов В.Н., и др. Низкотемпературные электролизеры воды для автономных энергоустановок с водородным накоплением энергии // *Альтернативная энергетика и экология (ISJAE)*. 2013. Т. 06/1. №127. С. 23-27.
35. Hancke R., Bujlo P., Holm T., et al. High-pressure PEM water electrolyser performance up to 180 bar differential pressure // *Journal of Power Sources*. 2024. Vol. 601, N234271.
36. Hourng L., Tsai T., Lin M. The analysis of energy efficiency in water electrolysis under high temperature and high pressure. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. International Conference on New Energy and Future Energy System (NEFES 2017), Kunming, China. 22-25 Sep 2017.
37. Байрамов А.Н. Программа вычисления технико-экономической эффективности использования водородных надстроек на АЭС. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2013660650. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 14 ноября 2013 г.
38. Holm T., Borsboom-Hanson T., Herrera O., et al. Hydrogen costs from water electrolysis at high temperature and pressure // *Energy Conversion and Management*. 2021. Vol. 237, N114106.
39. Hamdan M. High Pressure PEM Electrolysis: Status, Key Issues, and Challenges. In: *Electrolytic Hydrogen Production Workshop NREL, Golden, Colorado. 27-28 Feb 2014*. Available at: https://www.energy.gov/sites/default/files/2014/08/f18/fcto_2014_electrolytic_h2_wkshp_hamdan1.pdf

Авторы публикации

Байрамов Артем Николаевич – д-р техн. наук, профессор кафедры «Тепловая и атомная энергетика имени А.И. Андрющенко» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А. (СГТУ), ведущий научный сотрудник Отдела энергетических проблем Федерального исследовательского центра «Саратовский научный центр Российской академии наук», г. Саратов, Россия. *ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1573-0578>, art2198@yandex.ru*

Макаров Даниил Алексеевич – студент Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А. (СГТУ), лаборант-исследователь Отдела энергетических проблем Федерального исследовательского центра «Саратовский научный центр Российской академии наук», г. Саратов, Россия. *daniel_makaroff@mail.ru*

Седелкин Валентин Михайлович – д-р техн. наук, профессор Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А. (СГТУ), г. Саратов, Россия.

References

1. Energeticheskaya strategiya Rossii na period do 2035 g. / Pravitel'stvo Rossijskoj federacii. – Moskva, 2020 g. – 79 s.
2. Egorov AN, Bayramov AN. Elektroliz vody i obratimye toplivnye elementy – perspektivnye «zelenye» tekhnologii dlya vodorodnoj energetiki. *Energobezопасnost' i energosberezhenie*. 2023;№3(111):23-32.
3. Bayramov AN, Makarov DA. Vodorodnyj kompleks na osnove elektroliza vody vysokogo davleniya dlya kombinirovaniya s atomnoj stanciej. Patent RUS №2821330. 21.06.2024. Byul. № 18.

4. Bayramov AN, Makarov DA. Razrabotka i obosnovanie novogo principa kombinirovaniya AES s vodorodnym kompleksom. *Alternativnaya energetika i ekologiya (ISJAEE)*. 2024; 5(422):30-50
5. Bayramov AN. Razrabotka nauchnyh osnov povysheniya effektivnosti AES pri kombinirovanii s vodorodnym kompleksom [dissertation]. Saratov; 2022.
6. Aminov RZ, Bayramov AN. Kombinirovaniye vodorodnyh energeticheskikh ciklov s atomnymi elektrostanciyami. Moscow: Nauka; 2016. (In Russ).
7. Schalenbach M, Carmo M, Fritz D, et al. Pressurized PEM water electrolysis: Efficiency and gas crossover. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2013;38(35):14921-14933. doi: 10.1016/j.ijhydene.2013.09.013
8. Dang J, Li Y, Liu B, et al. Design and economic analysis of high-pressure proton exchange membrane electrolysis for renewable energy storage. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2023;48(28):10377-10393. doi: 10.1016/j.ijhydene.2022.11.250
9. Sethuraman V, Weidner J, Haug A, et al. Hydrogen Peroxide Formation Rates in a PEMFC Anode and Cathode: Effect of Humidity and Temperature. *Journal of The Electrochemical Society*. 2008;155(1). doi: 10.1149/1.2801980
10. Kopitzke R, Linkous C, Anderson R, et al. Conductivity and Water Uptake of Aromatic-Based Proton Exchange Membrane Electrolytes. *Journal of The Electrochemical Society*. 2000;147(5):1677-1681. doi: 10.1149/1.1393417
11. Slade S, Campbell S, Ralph T, et al. Ionic Conductivity of an Extruded Nafion 1100 EW Series of Membranes. *Journal of The Electrochemical Society*. 2002;149(12):1556-1564. doi: 10.1149/1.1517281
12. Silva R, Francesco M, Pozio A. Tangential and normal conductivities of Nafion® membranes used in polymer electrolyte fuel cells. *Journal of Power Sources*. 2004;134(1):18-26. doi: 10.1016/j.jpowsour.2004.03.028
13. LaConti A, Liu H, Mittelsteadt C. Polymer electrolyte membrane degradation mechanisms in fuel cells – findings over the past 30 years and comparison with electrolyzers. *ECS Transactions*. 2006;1(8):199-219. doi: 10.1149/1.2214554
14. Millet P, Ngameni R, Grigoriev SA, et al. PEM water electrolyzers: From electrocatalysis to stack development. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2009;35(10):5043-5052. doi: 10.1016/j.ijhydene.2009.09.015
15. Grigoriev SA, Fateev VN, Bessarabov DG, et al. Current status, research trends, and challenges in water electrolysis science and technology. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2020;45(49):26036-26058. doi: 10.1016/j.ijhydene.2020.03.109
16. Yigit T, Selamet O. Mathematical modeling and dynamic Simulink simulation of high-pressure PEM electrolyzer system. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2016;41(32):13901-13914. doi: 10.1016/j.ijhydene.2016.06.022
17. YAkimenko LM, Modylevskaya ID, Tkachek ZA. *Elektroliz vody*. Moscow: Himiya: 1970. (In Russ).
18. Bensmann B, Hanke-Rauschenbach R, Arias I, et al. Energetic evaluation of high pressure PEM electrolyzer systems for intermediate storage of renewable energies. *Electrochimica Acta*. 2013;110:570-580. doi: 10.1016/j.electacta.2013.05.102
19. Degiorgis L, Santarelli M, Cali M. Hydrogen from renewable energy: A pilot plant for thermal production and mobility. *Journal of Power Sources*. 2007;171(1):237-246. doi: 10.1016/j.jpowsour.2007.01.060
20. Marangio F, Santarelli M, Cali M. Theoretical model and experimental analysis of a high pressure PEM water electrolyser for hydrogen production. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2009;34(3):1143-1158. doi: 10.1016/j.ijhydene.2008.11.083
21. Voloshchenko GN, Porembskij VI. Elektroliznaya ustanovka vysokogo davleniya. Patent RUS №2660902. 11.07.2018. Byul. № 20.
22. S'oli D. Elektrolizer vysokogo davleniya. Patent RUS №2496918. 27.10.2013 Byul. № 30.
23. Kim H, Park M, Lee K. One-dimensional dynamic modeling of a high-pressure water electrolysis system for hydrogen production. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2013;38(6):2596-2609. doi: 10.1016/j.ijhydene.2012.12.006
24. Ito H, Maeda T, Nakano A, et al. Properties of Nafion membranes under PEM water electrolysis conditions. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2011;36(17):10527-10540. doi: 10.1016/j.ijhydene.2011.05.127
25. Zawodzinski T, Davey J, Valerio J, et al. The water content dependence of electro-osmotic drag in proton-conducting polymer electrolytes. *Electrochimica Acta*. 1995;40(3):297-302. doi: 10.1016/0013-4686(94)00277-8
26. Sartory M, Wallnöfer-Ogris E, Salman P, et al. Theoretical and experimental analysis of an asymmetric high pressure PEM water electrolyser up to 155 bar. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2017;42(52):30493-30508. doi: 10.1016/j.ijhydene.2017.10.112

27. Grigoriev SA, Millet P, Korobtsev SV, et al. Hydrogen safety aspects related to high-pressure polymer electrolyte membrane water electrolysis. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2009;34(14):5986-5991. doi: 10.1016/j.ijhydene.2009.01.047
28. Dobrovolskiy YUA, Volkov EV, Pisareva AV, i dr. Protonoobmennye membrany dlya vodorodno-vozdushnykh toplivnykh elementov. *Rossiiskij himicheskij zhurnal (ZHurnal Rossijskogo himicheskogo obshchestva im. D. I. Mendeleeva)*. 2006;1(6):95-104
29. Klose C, Trinke P, Böhm T, et al. Membrane Interlayer with Pt Recombination Particles for Reduction of the Anodic Hydrogen Content in PEM Water Electrolysis. *Journal of The Electrochemical Society*. 2018;165(16). doi: 10.1149/2.1241814jes
30. Correa G, Marocco P, Muñoz P, et al. Pressurized PEM water electrolysis: Dynamic modelling focusing on the cathode side. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2022;47(7):4315-4327. doi: 10.1016/j.ijhydene.2021.11.097
31. Hancke R, Holm T, Ulleberg O. The case for high-pressure PEM water electrolysis. *Energy Conversion and Management*. 2022;261(115642). doi: 10.1016/j.enconman.2022.115642
32. Dang J, Zhang J, Deng X, et al. Hydrogen crossover measurement and durability assessment of high-pressure proton exchange membrane electrolyzer. *Journal of Power Sources*. 2023;563(232776). doi: 10.1016/j.jpowsour.2023.232776
33. Grigoriev SA, Poremskiy VI, Korobtsev SV, et al. High-pressure PEM water electrolysis and corresponding safety issues. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2011;36(3):2721-2728. doi: 10.1016/j.ijhydene.2010.03.058
34. Kuleshov NV, Grigor'ev SA, Kuleshov VN, i dr. Nizkotemperaturnye elektrolizery vody dlya avtonomnykh energoustanovok s vodorodnym nakopleniem energii. *Alternativnaya energetika i ekologiya (ISJAE)*. 2013;06/1(127):23-27
35. Hancke R, Bujlo P, Holm T, et al. High-pressure PEM water electrolyser performance up to 180 bar differential pressure. *Journal of Power Sources*. 2024;601(234271). doi: 10.1016/j.jpowsour.2024.234271
36. Hourng L, Tsai T, Lin M. The analysis of energy efficiency in water electrolysis under high temperature and high pressure. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. International Conference on New Energy and Future Energy System (NEFES 2017), Kunming, China. 22-25 Sep 2017. doi: 10.1088/1755-1315/93/1/012035
37. Bayramov AN. Programma vychisleniya tekhniko-ekonomicheskoy effektivnosti ispol'zovaniya vodorodnykh nadstroek na AES. Svidetel'stvo o gosudarstvennoj registracii programmy dlya EVM №2013660650. Zaregistrovano v Reestre programm dlya EVM 14 noyabrya 2013 g.
38. Holm T, Borsboom-Hanson T, Herrera O, et al. Hydrogen costs from water electrolysis at high temperature and pressure. *Energy Conversion and Management*. 2021;237(114106). doi: 10.1016/j.enconman.2021.114106
39. Hamdan M. High Pressure PEM Electrolysis: Status, Key Issues, and Challenges. In: *Electrolytic Hydrogen Production Workshop NREL*, Golden, Colorado. 27-28 Feb 2014. Available at: https://www.energy.gov/sites/default/files/2014/08/f18/fcto_2014_electrolytic_h2_wkshp_hamdan1.pdf

Authors of the publication

Artem N. Bayramov – Department of Energy Problems of the Federal Research Center "Saratov Scientific Center of the Russian Academy of Sciences", Saratov State Technical University named after Y.A. Gagarin, Saratov, Russia. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1573-0578>, art2198@yandex.ru

Daniil A. Makarov – Department of Energy Problems of the Federal Research Center "Saratov Scientific Center of the Russian Academy of Sciences", Saratov State Technical University named after Y.A. Gagarin, Saratov, Russia. daniel_makarov@mail.ru

Valentin M. Sedelkin – Saratov State Technical University named after Y.A. Gagarin, Saratov, Russia.

Шифр научной специальности: 2.4.5. Энергетические системы и комплексы

Получено 18.03.2025 г.

Отредактировано 22.07.2025 г.

Принято 12.08.2025 г.