ISNN 3030-3907

2026/3
VOLUME 4

DEVELOPMENT OF SCIENCE

ILMIY JURNAL



Development of science

Ilmiy jurnal

2026/3 VOLUME 4

ISSN 3030 -3907

Ilmiy jurnal OAK rayosatining 2024 yil 27 sentabrdagi 361-son qaroriga asosan 02.00.00 kimyo fanlari hamda 2025 yil 12 fevral 367- son qaroriga asosan 05.00.00 texnika fanlari bo‘yicha falsafa doktori (PhD) va fan doktori (DSc) ilmiy darajasiga talabgorlarning dissertatsiya ishlari yuzasidan dissertatsiyalari asosiy ilmiy natijalarini chop etish tavsiya etilgan milliy ilmiy nashrlar ro‘yxatiga kiritilgan.

BOSH MUHARRIR:
Temirov Alisher Hoshim o‘g‘li – texnika fanlari falsafa doktori (PhD),Dotsent.
TAHRIRIYAT KENGASH RAISI:
Fozilov Sadriddin Fayzullayevich – texnika fanlari doktori, professor
TAHRIRIYAT KENGASH A’ZOLARI

TEXNIKA FANLARI/ TECHNICAL SCIENCES/ ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

Bozorov G‘ayrat Rashidovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor
Abdurahmonov Olim Rustamovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor
Adizov Bobur Zamirovich
O‘zbekiston Respublikasi Fanlar akademiyasi Umumiy va noorganik kimyo instituti, professor
Hayitov Ruslan Rustamjonovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor
Jumayev Qayum Karimovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor.
Berdiyev Dorob Murodovich
Islom Karimov nomidagi Toshkent Davlat Texnika Universiteti, professor
Maxmudov Rafiq Amonovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor.
Tilloyev Lochin Ismatilloyevich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Raxmonov Qahramon Sanakulovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Barakayev Nusratullo Rajabovich
Islom Karimov nomidagi Toshkent Davlat Texnika Universiteti, professor.
Jo‘rayev Xayrullo Fayziyevich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor.
Panoyev Erali Rajabboyevich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Ataullayev Sherzod Nabiullyevich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Murodov Malik Negmurodovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Axmedova Ozoda Bahronovna
Islom Karimov nomidagi Toshkent Davlat Texnika Universiteti.
Safarov Bahri Jumayevich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Xaydarov Axtam Amonovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Safarov Jasur Alijon o‘g‘li
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Асадова Раъно Дилмуратовна
Тошкент Давлат техника университети доценти

KIMYO FANLARI/ CHEMICAL SCIENCES/ ХИМИЧЕСКИЕ НАУКИ

Axmedov Voxid Nizomovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor
Umarov Baqo Bafoyevich
Buxoro Davlat Universiteti, professor
Kodirov Abduaxad Abduraximovich
Qarshi davlat Universiteti, professor
Qurbonov Mingniqul Jumagulovich
Qarshi davlat Universiteti, dotsent
Turemuratov Sharibay Naurizbaevich
O‘zbekiston Respublikasi Fanlar akademiyasi Qoraqalpog‘iston bo‘limi Bosh ilmiy kotibi, professor
Tursunov Kaxor Shonazarovich
Qarshi davlat Universiteti, professor
Do‘stov Hamro
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor
Panoyev Nodir Shavkatovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Olimov Bobur Bahodir o‘g‘li
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Kasimov Sherzod Abduazimovich
Termiz Davlat Universiteti, professor.
Aliqulov Rustam Valiyevich
Termiz Davlat Universiteti, professor
Tropov Xamza Tursunovich
Samarqand Davlat Universiteti, professor

IQTISODIYOT FANLARI/ ECONOMICS/ ЭКОНОМИЧЕСКИЕ НАУКИ

Nizamov Aslitdin Badreddinovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor.
Boboyev Akmal Choriyevich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor.
Ergashxojayeva Shaxnoza Djasurovna
Toshkent davlat iqtisodiyot universiteti, professor
Saidaxmedova Nodira Ilxomovna
Toshkent davlat iqtisodiyot universiteti, professor
Muxsinov Bekzod Toxirovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Shakarov Qulmat Ashirovich
Renessans ta'lim universiteti,dotsent.
Jumaeva Zulfiya Qayumovna
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Norova Salomat Yusupovna
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Avezova Shaxnoza Maxmudjonovna
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Jalilov Jamshid G‘anijonovich
Toshkent davlat iqtisodiyot universiteti, dotsent
Xasanova Gulruh Djumanazarovna
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.

PEDAGOGIKA FANLARI/ PEDAGOGICAL SCIENCES / ПЕДАГОГИЧЕСКИЕ НАУКИ

Siddiqova Sadoqat G‘afforovna
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Zoyirov Erkin Xalilovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, DSc, professor
Gaffarov Feruz Hasanovich
Puchon Universiteti, *professor*
Ruziyev Davron Yuldashevich
Buxoro Davlat Universiteti, professor
Muradova Firuza Rashidovna
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor.
Yunusova Gulandon Samiyevna
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor.
To‘xtayeva Zebo Sharifovna
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor.
Navro‘zova Gulchixra Nigmatovna
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Uzoqova Laylo Polvonovna
Buxoro muhandislik – texnologiya instituti, dotsent.
To‘raqulova Marjona Qiyom qizi
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Muradova Zarina Rashidovna
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Murodov Sanjar Aslonovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Shodiyev Jahongir Jo‘raqulovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent
Gaffarov Laziz Hasanovich
Buxoro muhandislik – texnologiya instituti, dotsent.

Tahririyat a’zolarning to‘liq ro‘yxati jurnalning www.devos.uz saytida keltirilgan.

Tahririyat hay’ati a’zolarining tarkibini o‘zgartirish hamda qo‘shimcha kiritish yoki tahririyat a’zoligidan chiqarish bosh muharrir tomonidan amalga oshiriladi.

ISSN 3030-3907

Development of science ilmiy jurnali 2024 yil 15 aprel kuni №256445 sonli guvohnoma bilan Davlat ro‘yxatidan o‘tgan.

To‘plam elektron ko‘rinishda (pdf formatida) mualliflarga taqdim etiladi. To‘plamga kiritiladigan maqolalarning mazmuni, ulardagi statistik ma’lumotlar va me’yoriy hujjatlarning to‘g‘riligiga hamda har qanday fikr - mulohazalarga mualliflarning o‘zlari mas’ul hisoblanadilar. Talablarga javob bermaydigan maqolalar to‘plamga kiritilmaydi. Tashkiliy qo‘mita maqola matnini qisqartirish, qisman tuzatish kiritish, seksiyalarga joylashtirish huquqiga ega.

ISSN 3030-3907

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ ПРОИЗВОДСТВА «ЗЕЛЕНОГО ВОДОРОДА» НА ОСНОВЕ ЭЛЕКТРОЛИЗА ВОДЫ

Рахматов Илхом Исматович

Бухарский государственный университет кандидат технических наук, профессор

Мамурова Дилдора Маруф кизи

Бухарский государственный университет магистр

Аннотация. В данной статье анализируются теоретические основы процесса производства водорода на основе электролиза воды с термодинамической и электрохимической точек зрения. Рассматриваются электрохимические реакции, происходящие в процессе электролиза, их энергетические затраты и показатели эффективности. В исследовании оцениваются плотность тока, напряжение и основные технологические параметры процесса электролиза как факторы, влияющие на эффективность производства водорода. Энергопотребление процесса электролиза сравнивается с теоретической и практической точек зрения, анализируется влияние поляризационных потерь и внутренних сопротивлений на общую эффективность. Полученные результаты позволяют разработать научно обоснованные рекомендации по совершенствованию технологии электролиза и повышению энергоэффективности.

Ключевые слова: электролиз воды, производство водорода, термодинамика, электрохимия, плотность тока, энергоэффективность.

Abstract. This article analyzes the theoretical foundations of the hydrogen production process based on water electrolysis from a thermodynamic and electrochemical perspective. The electrochemical reactions occurring during the electrolysis process, their energy requirements and efficiency indicators are considered. The study evaluates the current density, voltage and the main technological parameters of the electrolysis process as factors affecting the efficiency of hydrogen production. The energy consumption of the electrolysis process is compared from a theoretical and practical point of view, and the influence of polarization losses and internal resistances on the overall efficiency is analyzed. The results obtained allow us to develop scientifically based recommendations for improving electrolysis technology and increasing energy efficiency.

Keywords: water electrolysis, hydrogen production, thermodynamics, electrochemistry, current density, energy efficiency.

ISSN 3030-3907

Annotatsiya. Ushbu maqolada suvning elektrolizi asosida vodorod ishlab chiqarish jarayonining nazariy asoslari termodinamik va elektrokimyoviy nuqtai nazardan tahlil qilinadi. Elektroliz jarayonida sodir bo‘ladigan elektrokimyoviy reaksiyalar, ularning energiya sarfi va samaradorlik ko‘rsatkichlari ko‘rib chiqiladi. Tadqiqotda tok zichligi, kuchlanish va elektroliz jarayonining asosiy texnologik parametrlari vodorod ishlab chiqarish samaradorligiga ta’sir etuvchi omillar sifatida baholanadi. Elektroliz jarayonining energiya sarfi nazariy va amaliy nuqtai nazardan taqqoslanadi, qutblanish yo‘qotishlari va ichki qarshiliklarning umumiy samaradorlikka ta’siri tahlil qilinadi. Olingan natijalar elektroliz texnologiyasini takomillashtirish va energiya samaradorligini oshirish bo‘yicha ilmiy asoslangan tavsiyalar ishlab chiqishga imkon beradi.

Kalit so‘zlar: suvning elektrolizi, vodorod ishlab chiqarish, termodinamika, elektrokimyo, tok zichligi, energiya samaradorligi.

Введение.

В глобальном масштабе энергетические системы по-прежнему зависят в основном от ископаемого топлива - нефти, газа и угля, что приводит к увеличению выбросов парниковых газов (углекислого газа, метана, оксида азота и озона) и усугублению последствий изменения климата. В результате этого процесс перехода мировой энергетической системы от ископаемого топлива (уголь, нефть, газ) к возобновляемым источникам энергии (солнечная, ветровая, гидро) происходит медленно, и перевод системы производства энергии на чистые и устойчивые направления становится актуальной задачей. Исследования показывают, что водородная энергетика, в сочетании с возобновляемыми источниками энергии, позволяет как обеспечить энерго-непрерывность, так и поддерживать процесс сокращения выбросов углерода [1,2].

«Зеленый водород» рассматривается как важный инструмент в декарбонизации текущей энергосистемы, поскольку он может заменить ископаемое топливо (природный газ, нефть, уголь) в процессах производства энергии и промышленности. Например, чистый водород планируется заменить традиционные процессы в сталелитейной промышленности, тяжелом транспорте и химической промышленности[2,3].

Водород стал стратегическим направлением в мировой энергетической системе благодаря высокой энергоемкости и чистым свойствам сгорания. "Зелёный водород" - это водород, производимый электролизом воды с использованием возобновляемых источников энергии. Он позволяет производить энергию без выбросов углекислого газа. Этот метод может

ISSN 3030-3907

обеспечить энергонепрерывность с использованием возобновляемых источников энергии[3,4].

Технологии производства водорода путем электролиза (например, алкалин, ПЭМ и СОЭС) в настоящее время активно исследуются для повышения высокой эффективности, экономической и экологической устойчивости. Эти методы привлекают внимание мировых ученых как одно из теоретических и практических направлений перевода энергетических систем на чистые источники энергии[4]. В Республике Узбекистан стратегические задачи по развитию возобновляемых источников энергии и водородной энергетики определены как одно из приоритетных направлений государственной политики. 9 апреля 2021 года Президентом Республики Узбекистан было принято постановление

№ПП-5063 "О мерах по развитию возобновляемой и водородной энергетики в Республике Узбекистан."

В данном документе указаны научно-технические структуры, необходимые для развития возобновляемых источников энергии и водородной энергетики. В частности, на базе Национального научно-исследовательского института возобновляемых источников энергии при Министерстве энергетики создан Международный научно-исследовательский центр водородной энергетики, а также определено создание в структуре института Научно-исследовательского центра водородной энергетики и лаборатории испытаний и сертификации технологий возобновляемой и водородной энергетики. Постановление также предусматривает создание межведомственной комиссии, поддержку научных исследований и инновационных проектов, а также реализацию комплекса мер, направленных на укрепление энергетической безопасности страны. Приняв этот документ, Узбекистан стимулирует стратегию перехода на "зеленую энергетику" и закладывает основу для внедрения водородной энергетики на научно-практической основе[5].

Это решение стало важным шагом в укреплении научно-технологической базы страны в то время, когда принимаются меры по развитию водородной энергетики в глобальном масштабе.

Цель данной статьи - глубокий термодинамический и электрохимический анализ теоретических основ процесса производства водорода на основе электролиза воды, разработка научно обоснованных рекомендаций по оптимизации технологии электролиза путем изучения эффективности электрохимических процессов, плотности тока, условий напряжения и их влияния на энергопотребление.

ISSN 3030-3907

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ. Теоретические основы электролиза воды. Электролиз воды - это электрохимический процесс, при котором молекулы воды разделяются на водород и кислород с помощью электрического тока. Этот процесс считается наиболее чистым способом производства водорода, поскольку при использовании в процессе электроэнергии из возобновляемых источников не наблюдается прямых выбросов CO_2 в воздух. Этот аспект делает его одним из приоритетных направлений энергетического обмена в глобальном масштабе[6].

Процесс электролиза воды состоит из двух основных электрохимических полу реакций, которые происходят на катодных и анодных электродах соответственно. На катоде происходит реакция выделения водорода (HER), при которой молекулярный водород (H_2) образуется в результате приема электронов от молекул воды или ионов водорода. Этот процесс происходит путем соединения протонов с электронами на поверхности электрода.

На аноде происходит реакция выделения кислорода (OER), в ходе которой молекулы воды теряют электроны, в результате чего выделяется молекулярный кислород (O_2). Анодная реакция характеризуется сложной многоступенчатой передачей электронов и существенно влияет на общий расход энергии процесса электролиза.

Таким образом, основу процесса электролиза воды составляют электронный обмен и электрохимические превращения ионов, происходящие на поверхности электродов. Кинетические характеристики катодных и анодных реакций, материал электрода и условия рабочей среды являются важными факторами, определяющими эффективность и энергоэффективность процесса электролиза[7].

Существует несколько основных технологий электролиза для производства водорода путем электролиза воды, которые различаются по энергоэффективности, условиям эксплуатации, экономическим затратам и техническим характеристикам.

Процессы электролиза воды включают щелочной электролиз (алкалин), мембранный электролиз с обменом протонов (ПЭО), мембранный электролиз с анионным обменом (АЭО) и твердокислотные электролизаторы (ТЭО). У каждой технологии есть свои преимущества и ограничения.

Электролиз щелочной воды (Alkalin Water Electrolysis - AWE)

Технология алкильного электролиза является старейшей и экономически выгодной формой электролиза воды. В этом методе в качестве электролита используется растворенный в воде гидроксид калия (KOH) или

ISSN 3030-3907

гидроксид натрия (NaOH), что обеспечивает ионный обмен между электродами. Алкалоидные электролизёры имеют простую структуру, в основном используют никелевые катализаторы и имеют относительно низкие начальные затраты и уровень надежности. Однако их эффективность и плотность тока ограничены, что затрудняет управление ими с высокой эффективностью[6]. В то же время системы AWE широко используются в торговле, производстве или предоставлении услуг, направленных на получение прибыли, и играют ключевую роль в системах производства водорода в промышленности.[7]

Протонно-обменный мембранный электролиз (PEM Water Electrolysis)

Технология электролиза PEM обладает высокой эффективностью, производя очень чистый (более 99,9%) водород[8]. В этом методе вода направляется на анод, и протоны проходят через мембрану к катоду, где они соединяются с электронами, образуя водород. Электролизаторы ПЭМ компактны, работают при высоких плотностях тока и быстро интегрируются с возобновляемыми источниками энергии. Однако эта технология требует дорогостоящих катализаторов и мембран, что увеличивает общие затраты.

Электролизаторы твердого оксида (Solid Oxide Electrolysis Cells - SOEC)

Технология SOEC работает при высоких температурах (около 500-1000 °C), и в этом процессе достигается высокая термодинамическая эффективность разделения водяного пара на водород и кислород. Высокие температуры снижают энергопотребление и позволяют преобразовывать термическую энергию в электрическую, однако эта технология в настоящее время находится в большей степени на научно-экспериментальной стадии и требует решения таких проблем, как затраты и стабильность компонентов.

Кинетика HER и OER (Hydrogen and Oxygen Evolution Reactions)

Эффективность электролиза воды напрямую зависит от кинетики катодной и анодной реакций. Процесс электролиза состоит из двух основных электрохимических реакций:

Катод: $2H^+ + 2e^- \rightarrow H_2$ (Hydrogen Evolution Reaction—HER)

Анод: $2H_2O \rightarrow O_2 + 4H^+ + 4e^-$ (Oxygen Evolution Reaction—OER)

Катодная реакция (HER)

На катоде протоны принимают электроны и превращаются в газообразный водород. Скорость реакции зависит от площади поверхности электрода, материала катализатора и плотности тока[6]. Например, катализаторы на основе никеля, платины или палладия значительно увеличивают скорость реакции на катоде.

ISSN 3030-3907

$$j = j_0[\exp\left(\frac{\alpha nF\eta}{RT}\right) - \exp(-\frac{(1-\alpha)nF\eta}{RT})]$$

где

• j - плотность тока (А/м^2),
• j_0 - плотность тока обмена (exchange current density),
• η - дополнительное напряжение (В),
• α - коэффициент трансфера,
• n - число электронов,
• F - константа Фарадея,
• R - газовая константа,
• T - температура (К).

Вышеуказанное j_0 представляет собой кинетическую скорость процесса HER, что повышает энергоэффективность.

Анодная реакция (OER)

На аноде молекулы воды распадаются на кислород, протоны и электроны. Анодная реакция кинетически медленнее катодной, поскольку это многостадийная реакция с 4 электронами[11].

$$2H_2O \rightarrow O_2 + 4H^+ + 4e^-$$

Для процесса OER используются оксиды иридия и рутения или другие катализаторы оксидов металлов. Плотность тока и добавочное напряжение определяют эффективность анодной реакции. Газовые пузырьки накапливаются на поверхности анода, уменьшая контактное поле, что увеличивает добавочное напряжение[7].

Энергетический анализ процесса электролиза

Энергетический анализ процесса электролиза воды играет важную роль в оценке эффективности производства водорода. В процессе электролиза молекула воды под действием электрической энергии распадается на водород и кислород. Термодинамические основы этого процесса описываются понятиями свободной энергии Гиббса и энтальпии. В стандартных условиях значение свободной энергии Гиббса, необходимой для электролиза воды, составляет ΔG = 237,2 кДж/моль, а соответствующее ему минимальное теоретическое напряжение равно 1,23 В. Это значение представляет собой наименьшее напряжение, необходимое для термодинамической реализации процесса электролиза[12].

Однако в практических электролизерах процесс протекает при значениях выше этого теоретического напряжения. Основными причинами этого являются кинетические ограничения электродных реакций и потери

ISSN 3030-3907

энергии в системе. Реальное напряжение определяется следующим выражением:

$$E_{real} = E^0 + \eta_{HER} + \eta_{OER} + iR$$

где:

η_{HER} - сверхпотенциал реакции выделения водорода,

η_{OER}- сверхпотенциал реакции выделения кислорода,

iR - потери электролита, мембраны и контактов[13].

Энергоэффективность является одним из важных показателей в процессе электролиза, который определяется отношением теоретического энергопотребления к реальному. Энергоэффективность практических щелочных и протонно-обменных мембранных (ПОМ) электролизеров обычно находится в пределах 60-80%. На эффективность существенно влияют плотность тока, рабочая температура, материал электрода и активность катализатора[14].

Газовые пузырьки, образующиеся на поверхности электрода, также приводят к увеличению потерь энергии. Газовые пузырьки уменьшают активное поле поверхности электрода, вызывая увеличение локальной плотности тока, что приводит к локальному перенапряжению. Это снижает общую энергетическую эффективность процесса электролиза, особенно при высоких плотностях тока[13].

Поэтому энергетический анализ процесса электролиза служит важной основой для научных исследований, направленных на снижение энергозатрат за счет совершенствования конструкции электродов, оптимизации катализаторов и правильного выбора условий работы. Современные исследования показывают, что путем проведения процесса электролиза при высоких температурах можно уменьшить кинетические барьеры и повысить общую энергоэффективность.

На сегодняшний день в Республике Узбекистан вопросы модернизации энергосистемы, обеспечения энергетической безопасности и сокращения выбросов парниковых газов являются одними из приоритетных задач. В этом процессе эффективное использование возобновляемых источников энергии и развитие водородной энергетики рассматривается как важное стратегическое направление. Особую актуальность приобретают технологии производства водорода на основе электролиза воды, неразрывно связанные с природно-климатическими условиями и имеющимся энергетическим потенциалом страны.

В Республике Узбекистан приняты важные нормативно-правовые акты по развитию возобновляемой энергетики и водородной энергетики. В

ISSN 3030-3907

частности, в Постановлении Президента Республики Узбекистан от 21 декабря 2022 года № ПП-447 "О мерах по развитию возобновляемых источников энергии и повышению энергоэффективности в Республике Узбекистан в 2023-2030 годах" в качестве приоритетных задач определены внедрение возобновляемых источников энергии, внедрение современных технологий и поддержка научных исследований. В данном документе в качестве отдельного направления обозначены перспективы развития водородной энергетики.

Также в рамках Стратегии развития энергетической отрасли Республики Узбекистан до 2030 года предусмотрены возможности широкого внедрения солнечной и ветровой энергетики, направления электроэнергии, получаемой из этих источников, на производство водорода в качестве энергоносителя. Это создает благоприятные условия для интеграции технологий электролиза воды с возобновляемыми источниками энергии. Особенно большое значение имеют перспективы производства "зеленого водорода" на основе электролизеров в районах с высоким потенциалом солнечной энергии[15].

Водородная энергетика открывает новые возможности для отечественной промышленности, в частности, в химической промышленности, нефтегазопереработке, металлургии и транспорте. Водород, производимый на основе электролиза воды, позволяет снизить потребность в импортных энергоресурсах, повысить экологическую чистоту производственных процессов и создать продукцию с высокой добавленной стоимостью. Кроме того, данное направление будет способствовать развитию новых фундаментальных и прикладных исследований в области электрохимии, материаловедения и энергетики для научно-исследовательских институтов и высших учебных заведений.

Поэтому научные исследования, направленные на углубленное изучение теоретических основ процесса производства водорода на основе электролиза воды и повышение энергоэффективности, являются актуальными не только с научной, но и с практической и стратегической точки зрения в условиях Узбекистана.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ. В данной статье проанализированы теоретические основы процесса производства водорода на основе электролиза воды с термодинамической и электрохимической точек зрения. На основе научных источников освещены понятия свободной энергии Гиббса, минимального теоретического напряжения, перенапряжения, плотности тока и энергоэффективности, являющиеся основными показателями процесса

ISSN 3030-3907

электролиза. Анализ показал, что хотя минимальное напряжение, необходимое для теоретической реализации электролиза воды, составляет 1,23 В, в практических условиях реальный расход энергии выше из-за кинетики электрода и омических потерь.

Установлено, что кинетические ограничения реакций эволюции водорода (HER) и эволюции кислорода (OER) в процессе электролиза оказывают существенное влияние на энергоэффективность. В частности, образование газовых пузырьков на поверхности электрода и возникновение локального перенапряжения приводит к неравномерному протеканию электрохимических процессов. Поэтому повышение активности электродных материалов и катализаторов, а также оптимизация микроструктуры электрода и условий эксплуатации являются важными факторами снижения потерь энергии.

В условиях Узбекистана высокий потенциал возобновляемых источников энергии, в частности солнечной и ветровой энергетики, создает благоприятные возможности для развития производства водорода на основе электролиза воды. Задачи, определенные в постановлениях Президента и стратегиях развития энергетической отрасли, указывают на необходимость научного и практического внедрения водородной энергетики. Интеграция этих технологий с возобновляемыми источниками энергии служит обеспечению устойчивости энергосистемы за счет производства "зеленого водорода.

Таким образом, углубленное изучение теоретических основ процесса производства водорода на основе электролиза воды и проведение научных исследований по повышению энергоэффективности имеет стратегическое значение для Узбекистана, и это направление в будущем будет играть важную роль в развитии местной промышленности, энергетики и научно-исследовательской деятельности.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ:

1. Sameer Algburi , Omer Al-Dulaimi, Hassan Falah Fakhruldeen, Doaa H. Khalaf, Raad Naser Hanoon, Feryal Ibrahim Jabbar, Ali Khudhair Al-Jiboory, Stella Kiconco. The green hydrogen role in the global energy transformations. Renewable and Sustainable Energy Transition Volume 8, December 2025, 100118

2. Veeraraghavan sakthimurugan, G Lakshmikanth, N Balaji, R Roopashree, Dhr uv Kumar, Yuvarajan Devarajan [a]. Green hydrogen revolution: Advancing electrolysis, market integration, and sustainable energy transitions towards a net-zero future. Results in Engineering Volume 26, June 2025, 104849

ISSN 3030-3907

3. M.A. Elazab, Abdelrahman T. Elgohr, Mohamed Bassyouni [b], Abd Elnaby Kabeel [c], Mohammed El Hadi Attia [d], Mohamed Kamel Elshaarawy, Abdelrahman Kamal Hamed, Hassan A.H. Alzahrani. Green Hydrogen: Unleashing the Potential for Sustainable Energy Generation. Results in Engineering Volume 27, September 2025, 106031
4. Taoufik Brahim, Abdelmajid Jemni [b]. Green hydrogen production: A review of technologies, challenges, and hybrid system optimization. Renewable and Sustainable Energy Reviews Volume 225, January 2026, 116194
5. O‘zbekiston Respublikasida qayta tiklanuvchi va vodorod energetikasini rivojlantirish chora-tadbirlari to‘g‘risida : PQ-5063-son Qaror, 2021-yil 9-aprel. https://lex.uz/docs/5368769 (murojaat sanasi: 15.02.2026).
6. S Aslam, S Rani, K Lal, M Fatima, T Hardwick, B Shirinfar, N Ahmed. Electrochemical hydrogen production: sustainable hydrogen economy. Green Chemistry, 2023
7. Xi B., Feng T., Zhang T. Hydrogen Energy: Hydrogen Production through Water Electrolysis Technology. Frontiers in Sustainable Development.
8. Srinivas Prasad Sanaka, K. Ramanaiah, Pulipaka Vanni. Performance analysis of Pem Electrolyser for green hydrogen production. Sustainable Chemistry for Climate Action Volume 7, December 2025, 100162
9. Ajitanshu Vedrtnam [a b], Kishor Kalauni, Rahul Pahwa. A review of water electrolysis technologies with insights into optimization and numerical simulations. International Journal of Hydrogen Energy Volume 140, 20 June 2025, Pages 694-727
10. Rafika Louli, Stefan Giurgea, Issam Salhi, Salah Laghrouche, Abdesslem Djerdir. A Critical Review of Green Hydrogen Production by Electrolysis: From Technology and Modeling to Performance and Cost. Energies, 2026
11. Kumar, S.S., Lim, H. Recent advances in hydrogen production through proton exchange membrane water electrolysis – a review. Sustainable Energy & Fuels, 2023
12. Naruki Endo, Eisuke Shimoda, Kiyotaka Goshome, Toshihiro Yamane, Tsuyo shi Nozu, Tetsuhiko Maeda [a]. Simulation of design and operation of hydrogen energy utilization system for a zero emission building. International Journal of Hydrogen Energy , Volume 44, Issue 14, 15 March 2019, Pages 7118-7124
13. Angulo A., van der Linde P., Gardeniers H., Modestino M. A., Rivas D. F. Gas Evolution in Water Electrolysis. Chemical Reviews.
14. Ursúa A., Gandía L. M., Sanchis P. Hydrogen Production through Water Electrolysis Technology. International Journal of Hydrogen Energy.

ISSN 3030-3907

15. O‘zbekiston Respublikasi Prezidenti. 2023 - 2030 yillarda qayta tiklanuvchi energiya manbalarini rivojlantirish va energiya samaradorligini oshirish chora-tadbirlari to‘g‘risida PQ–447-son qarori. Toshkent, 2022-yil 21-dekabr.

ISSN 3030-3907