

УДК 621.355
AGRIS P05

https://doi.org/10.33619/2414-2948/115/15

НЕКОТОРЫЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ПОЛУЧЕНИЯ И ХРАНЕНИЯ ВОДОРОДА

©Исманов Ю. Х., ORCID: 0000-0001-8176-2602, SPIN-код: 1183-7001,
д-р физ.-мат. наук, Кыргызский государственный технический университет им. И.
Раззакова, г. Бишкек, Кыргызстан, i_yusupjan@mail.ru

©Джаманкызов Н. К., ORCID: 0000-0002-4741-8741, SPIN-код: 1471-6954, Scopus ID:
7801566578, д-р физ.-мат. наук, Институт физики им. академика Ж. Ж. Жээнбаева НАН
Кыргызской Республики, г. Бишкек, Кыргызстан, 265a nasip49@gmail.com

©Тынышова Т. Д., ORCID: 0009-0007-5235-7115, SPIN-код: 9917-4190, ResearcherID: HPB-
7352-2023, канд. физ.-мат. наук, Кыргызский государственный технический университет
им. И. Раззакова, г. Бишкек, Кыргызстан, ttynyshova@mail.ru

©Кайназаров А. Т., SPIN-код: 8765-4810, канд. техн. наук, Кыргызский государственный
технический университет им. И. Раззакова, г. Бишкек, Кыргызстан, ascarkainaz@mail.ru

SOME TECHNOLOGICAL ASPECTS OF HYDROGEN PRODUCTION AND STORAGE

©Ismanov Y., ORCID: 0000-0001-8176-2602, SPIN-code: 1183-7001, Dr. habil., Kyrgyz State
Technical University named after I. Razzakov, Bishkek, Kyrgyzstan, i_yusupjan@mail.ru

©Dzhamankizov N., ORCID: 0000-0002-4741-8741, SPIN-code: 1471-6954, Scopus ID:
7801566578, Dr. habil., Institute of Physics named after Academician Zh. Z. Zheenbaev of the
National Academy of Sciences of the Kyrgyz Republic, Bishkek, Kyrgyzstan, nasip49@gmail.com

©Tynyshova T., ORCID: 0009-0007-5235-7115, SPIN-code: 9917-4190, ResearcherID:
HPB-7352-2023, Ph.D., Kyrgyz State Technical University
named after I. Razzakov, Bishkek, Kyrgyzstan, ttynyshova@mail.ru

©Kainazarov A., SPIN-code: 8765-4810, Ph.D., Kyrgyz State Technical University
named after I. Razzakov, Bishkek, Kyrgyzstan, ascarkainaz@mail.ru

Аннотация. Проведен краткий анализ современного состояния исследований в области производства и хранения водорода для целей водородной энергетики. Проведенный анализ исследований показал, что основным промышленным методом получения водорода на современном этапе развития водородных технологий является классический метод электролиза воды. С этой целью в работе рассмотрены различные типы электролизеров, проведено сравнение различных типов электролизеров по рабочей температуре, эффективности напряжения стека, а также их преимуществам и недостаткам. Показано, что снижение стоимости возобновляемой электроэнергии повышает интерес к электролизу воды, поскольку этот метод позволяет получать водород, не выделяя углекислый газ (CO₂). Хранение водорода опирается в основном на традиционные технологии, такие как сжатый газ и криогенная жидкость, тогда как для крупномасштабных применений предпочтительным методом оказывается подземное хранение. В последние годы наблюдается стремительное развитие твердофазного хранения водорода, которое считается самым безопасным способом хранения. Для хранения большего количества водорода в меньшем объеме одним из решений является его сжатие до высокого давления. Наиболее распространенным способом хранения водорода является его сжатие в стальные газовые баллоны под давлением до 700 бар. При сжатии водородного газа до 700 бар его объемная плотность достигает 36 кг/м³. Это может быть реализовано в современных легких композитных стальных баллонах высокого давления.

Abstract. Provides a brief analysis of the current state of research in the field of hydrogen production and storage for hydrogen energy applications. The conducted analysis shows that the primary industrial method for hydrogen production at the current stage of hydrogen technology development is the classical method of water electrolysis. In this regard, the study examines various types of electrolyzers, comparing them based on operating temperature, stack voltage efficiency, as well as their advantages and disadvantages. It is shown that the reduction in the cost of renewable electricity increases interest in water electrolysis, as this method allows for hydrogen production without emitting carbon dioxide (CO₂). Hydrogen storage mainly relies on traditional technologies such as compressed gas and cryogenic liquid, while for large-scale applications, underground storage is the preferred method. In recent years, there has been rapid development in solid-phase hydrogen storage, which is considered the safest storage method. To store larger amounts of hydrogen in a smaller volume, one solution is to compress it to high pressure. The most common method of hydrogen storage is compression in steel gas cylinders at pressures of up to 700 bar. When hydrogen gas is compressed to 700 bar, its volumetric density reaches 36 kg/m³. This can be achieved using modern lightweight composite steel high-pressure cylinders.

Ключевые слова: водород, производство водорода, хранение водорода, электролизер, возобновляемая энергетика.

Keywords: hydrogen, hydrogen production, hydrogen storage, electrolyzer, renewable energy.

Хотя значительная часть мирового спроса на энергию в настоящее время удовлетворяется за счёт ископаемого топлива, вредные последствия его сжигания невозможно игнорировать: выбросы парниковых газов, кислотные дожди и другие факторы, наносящие разрушительный ущерб окружающей среде и человечеству. В связи с этим процесс глобальной энергетической трансформации набирает обороты, чему способствует стремительное развитие использования возобновляемых источников энергии. Для усиления этого движения и снижения выбросов рассматривается возможность использования водорода как альтернативного носителя энергии. Генерация электроэнергии с помощью водорода в топливных элементах не вызывает локального загрязнения, поскольку единственным побочным продуктом является чистая вода. Ещё одно преимущество водорода заключается в его высокой удельной энергоёмкости: он обеспечивает в три раза больше энергии на единицу массы, чем сжигание бензина [1–3].

Кроме того, водород может производиться локально, что снижает зависимость стран от внешних поставщиков энергии. Водород можно получать из широкого спектра веществ, таких как вода, нефть, газ, биотопливо, осадок сточных вод и другие источники [4–6].

Изобилие воды на Земле гарантирует возможность устойчивого производства водорода. Разделение воды методом электролиза открывает перспективные возможности для интеграции с возобновляемыми источниками энергии. Благодаря тому, что водород можно вырабатывать заранее, его использование компенсирует переменную природу возобновляемых источников энергии. Это делает водород подходящим как для распределённого производства, так и для централизованного производства с прямым подключением к удалённым источникам возобновляемой энергии. Водород, полученный методом электролиза, идеально подходит для использования в топливных элементах. Технологии стационарных топливных элементов также способствуют развитию резервного энергоснабжения и автономных электростанций. В сочетании с топливными элементами

водород предоставляет альтернативу традиционным электрическим сетям, так как электроэнергию можно производить непосредственно в месте её потребления, что снижает необходимость в длительном хранении водорода. В последние годы были достигнуты значительные успехи в интеграции водорода в энергетические системы — от его производства и хранения до повторного преобразования в электричество и обеспечения безопасности. Подробные описания текущего прогресса можно найти в различных исследованиях, где рассматриваются новые методы интеграции водородных технологий [7].

Существует широкое согласие относительно того, что производство водорода из возобновляемых источников энергии (солнечной, ветровой и др.) представляет собой перспективный путь к устойчивому развитию мира [8–9]. В указанных работах было отмечено, что переход на производство водорода с использованием возобновляемой электроэнергии способствует взаимному преобразованию водорода и электричества, а также расширяет возможности применения водорода [10–11].

Базовые технологии получения водорода

На сегодняшний день для промышленного производства водорода в основном используются паровой риформинг, газификация угля и электролиз воды. Другие методы, такие как риформинг этанола и сахаров, биофотолитиз воды, фотохимическое разложение воды и высокотемпературное расщепление воды, находятся на стадии разработки и редко применяются в промышленности. Снижение стоимости возобновляемой электроэнергии повышает интерес к электролизу воды, поскольку этот метод позволяет получать водород, не выделяя углекислый газ (CO_2). Технология электролиза достаточно хорошо отработана. В ячейке электролиза воды два электрода помещаются в электролит и подключаются к источнику питания, создавая электрический ток, как показано на Рисунке 1. При подаче достаточно высокого напряжения вода разлагается с образованием водорода на катоде и кислорода на аноде. Добавление электролита повышает проводимость воды, способствуя постоянному току. В электролизе воды широко используются кислоты и твёрдые полимерные электролиты, причём в качестве носителей заряда применяются различные ионы: H^+ , OH^- , O_2^- и другие. Однако суммарная реакция электролиза воды остаётся неизменной:

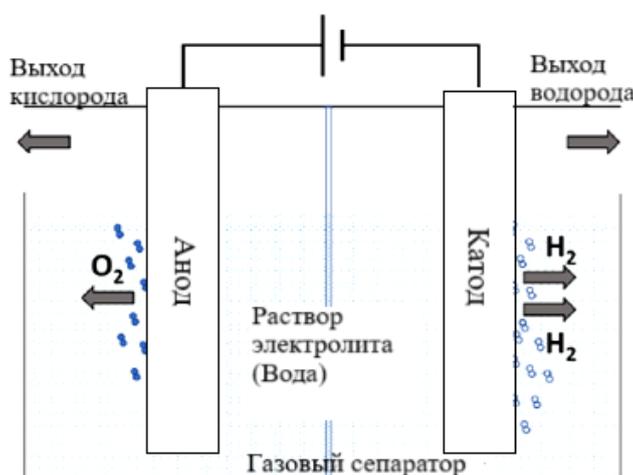
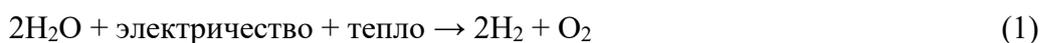


Рисунок 1. Принцип водного электролиза

Два электрода помещаются в электролитический раствор и подключаются к источнику питания для проведения электрического тока. Вода разлагается на чистый водород и кислород, которые выделяются на катоде и аноде соответственно (Рисунок 1).

Существует три основных типа электролизёров, их характеристики представлены в Таблице.

Таблица

СРАВНЕНИЕ РАЗЛИЧНЫХ ТИПОВ ЭЛЕКТРОЛИЗЕРОВ
 ПО РАБОЧЕЙ ТЕМПЕРАТУРЕ, ЭФФЕКТИВНОСТИ НАПРЯЖЕНИЯ СТЕКА,
 А ТАКЖЕ ИХ ПРЕИМУЩЕСТВАМ И НЕДОСТАТКАМ

Тип	Рабочая температура	Эффективность напряжения стека	Преимущества и недостатки
Щелочной электролизер	<80°C	62%–82%	Преимущества: хорошая долговечность и зрелость технологии. Недостатки: узкий диапазон частичной нагрузки, низкая плотность тока.
Электролизер с протонно-обменной мембраной	<80°C	67%–82%	Преимущества: хорошая компактность и эффективность, быстрый отклик. Недостатки: более высокая стоимость и меньшая долговечность.
Твердооксидный электролизер	700°C	Около 100%	Преимущества: высокая эффективность и рабочее давление, повторное использование тепла. Недостатки: низкая зрелость технологии, недостаточная коммерциализация.

Здесь под эффективностью напряжения стека электролизера подразумевают, насколько эффективно электрическая энергия используется для разложения воды на водород и кислород в электролизере. Эффективность напряжения стека определяется как отношение термодинамически минимального напряжения (около 1,23 В при стандартных условиях) к фактическому рабочему напряжению электролизера.

Формула для расчета эффективности напряжения стека:

$$\eta_{stack} = \frac{U_{thermo}}{U_{actual}} 100\%, \quad (2)$$

где U_{thermo} — теоретическое минимальное напряжение (~1,23 В), U_{actual} — реальное напряжение стека электролизера (обычно выше из-за омических потерь, переноса заряда и кинетических ограничений).

Щелочные электролизеры доминируют на рынке и разрабатываются уже много лет. Твёрдооксидные электролизеры разлагают воду при очень высоких температурах, потребляя меньше электроэнергии, что делает их более эффективными. Протонообменные мембранные электролизёры стремительно набирают популярность, и уже появились крупные коммерческие установки.

Преимущества протонообменных мембранных электролизеров: низкая газопроницаемость; высокая проводимость протонов; тонкие мембраны; компактность; высокая эффективность при высокой мощности; быстрый отклик; относительно низкая рабочая температура; простая конструкция и балансирующая система.

Стек электролизера состоит из нескольких ячеек, соединённых последовательно, что позволяет достичь высокого напряжения даже при низком напряжении каждой ячейки (~2 В). Также возможно параллельное соединение стеков, что позволяет создавать системы

мощностью в несколько мегаватт при сравнительно низком напряжении (до нескольких кВ) и высокой плотности тока [12–14].

Для работы системы необходимы блок питания и балансирующая система, как показано на Рисунке 2. Полученный водород поступает в газовый сепаратор, где отделяется от воды, очищается и осушается. Насос прокачивает электролит через ячейки, а теплообменник поддерживает оптимальную рабочую температуру [15–17].

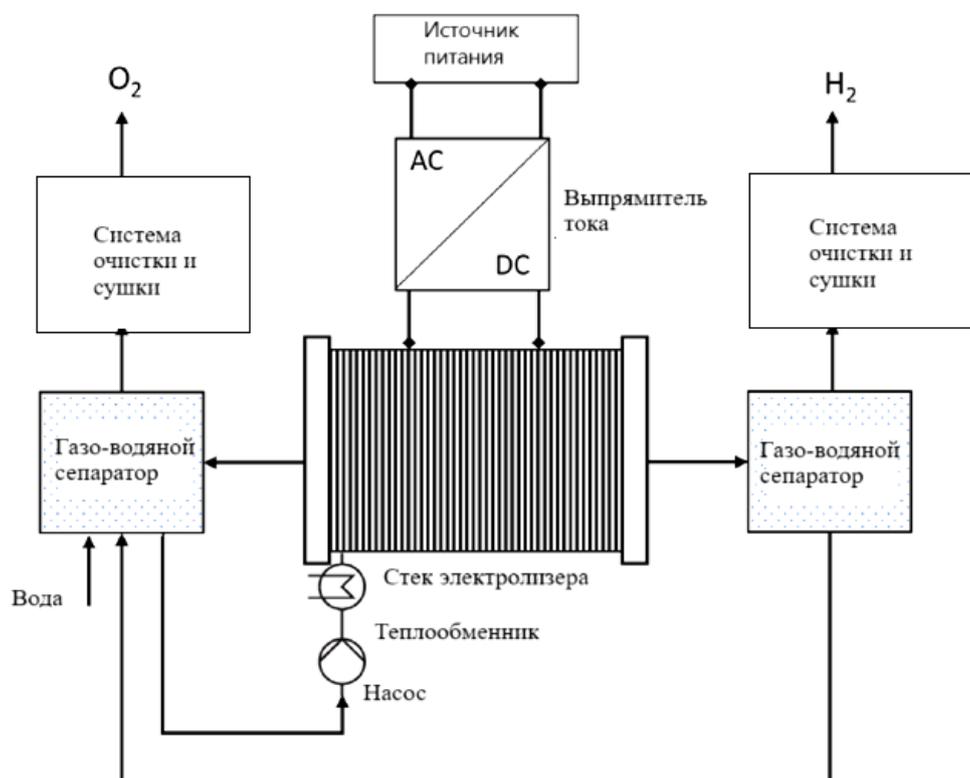


Рисунок 2. Электролизер

Электролизер подключен к источнику питания через преобразователь переменного тока в постоянный (AC/DC) и соединен с газо-водяными сепараторами и системами очистки/сушки для выделения чистого водорода и кислорода. Подводимая вода хранится в газо-водяном сепараторе и подается в электролизер с помощью насоса. В блоке питания используются трансформатор и выпрямитель, которые обеспечивают электролизер постоянным током. Большинство коммерческих электролизеров работают в режиме управления током, что позволяет фиксировать скорость производства водорода на заданном значении [18].

Для количественного анализа динамики электролизера можно использовать модель молекулярного баланса на электродах, из которой выводится уравнение напряжения [19–21]. Уравнение (2) представляет собой широко используемую модель электролизера, которая является суммой напряжения разомкнутой цепи $U_{раз}$, активационного перенапряжения $U_{акт}$, омического перенапряжения $U_{ом}$ и концентрационного перенапряжения $U_{конц}$:

$$U_{\Sigma} = U_{раз} + U_{акт} + U_{ом} + U_{конц} .$$

Потери перенапряжения, вызванные электрохимической реакцией, омическими потерями и переносом массы соответственно, могут быть описаны с использованием следующей модели [22]:

$$U_{\Sigma} = U_{\text{раз}} + \frac{RT}{2F} \ln \left(\frac{P_{\text{H}_2} P_{\text{O}_2}^{0,5}}{c_{\text{H}_2\text{O}}} \right) + (R_{\text{экс}} + R_{\text{мем}})i + \frac{RT}{b_a 2F} \ln \left(\frac{i}{i_0} \right) + \frac{RT}{b_k 2F} \ln \left(1 + \frac{i}{i_0} \right), \quad (3)$$

где индекс a обозначает анод, а k — катод, R — газовая постоянная, T — рабочая температура, F — постоянная Фарадея, i — плотность тока, i_0 — плотность обменного тока, b_a и b_k — коэффициенты переноса заряда, $R_{\text{экс}}$ — эквивалентное сопротивление электродов и интерфейса, $R_{\text{мем}}$ — сопротивление мембраны, $P_{\text{O}_2}^{0,5}$ и P_{H_2} — давление кислорода и водорода, а $c_{\text{H}_2\text{O}}$ — активность воды (равна 1, если вода находится в жидком состоянии). Определение параметров обсуждается в [23–25].

Основные способы хранения водорода

Высокая удельная энергоёмкость водорода делает его одним из самых перспективных топлив будущего. Водород содержит 33,33 кВт·ч энергии на килограмм, тогда как бензин и дизельное топливо — всего 12 кВт·ч [26]. Однако для хранения того же количества водорода требуется значительно больший объем. Развитие технологий хранения водорода, следовательно, является ключевой предпосылкой для водородных энергетических систем. Традиционные технологии хранения предусматривают сжатый газ и криогенную жидкость, тогда как для крупномасштабных применений предпочтительным методом оказывается подземное хранение. В последние годы наблюдается стремительное развитие твердофазного хранения водорода, которое считается самым безопасным способом хранения. Для хранения большего количества водорода в меньшем объеме одним из решений является его сжатие до высокого давления. Наиболее распространенным способом хранения водорода является его сжатие в стальные газовые баллоны под давлением до 700 бар [27].

При сжатии водородного газа до 700 бар его объемная плотность достигает 36 кг/м³ [28].

Это может быть реализовано в современных легких композитных стальных баллонах высокого давления [29].

Сжатый водород широко используется при его транспортировке по водородопроводам и в водородных трубных трейлерах, однако транспортные возможности существенно ограничиваются весом газового баллона. Ведутся разработки более легких материалов, которые позволят сжимать водород при высоком давлении [30].

Еще одной технической проблемой, требующей решения, является теплообменный процесс во время сжатия. По мере повышения температуры внутри баллона может происходить деградация композитного материала, что может привести к серьезным последствиям. Исследования в области материалов с высокой теплопроводностью и конструкционного дизайна направлены на улучшение теплообмена [30].

Для крупномасштабного хранения водорода предложено несколько решений. Помимо подземных резервуаров для хранения сжатого и сжиженного водорода, основными вариантами для средне- и долгосрочного хранения являются подземные хранилища, такие как водоносные горизонты, истощенные месторождения природного газа и нефти, а также

соляные каверны. Первые два типа хранилищ имеют пористую структуру, и их вместимость может зависеть от геологических условий. В настоящее время около 75% мировых подземных хранилищ водорода располагаются в истощенных месторождениях [28].

В последние годы соляные каверны привлекли значительное внимание благодаря их устойчивости и непроницаемым стенкам. Объем такой каверны может варьироваться от 100 000 до 1 000 000 м³, а рабочее давление достигать 200 бар [26].

Однако развитие технологии хранения водорода в соляных кавернах ограничено рядом технических факторов, среди которых важную роль играет герметичность скважин и пропускная способность наземной инфраструктуры. Кроме того, при выборе мест для хранилищ необходимо учитывать экологические ограничения и требования устойчивого развития [24].

Поскольку водород может быть переведен в жидкое состояние при низкой температуре (20–21 К) и атмосферном давлении, жидкий водород представляет собой еще один способ хранения водорода в компактном объеме. Его объемная плотность может достигать 70,8 кг/м³, что даже немного выше, чем у твердого водорода (70,6 кг/м³) [24].

Однако процесс сжижения водорода требует значительных затрат времени и энергии, при этом теряется около 40% энергии. В настоящее время жидкий водород используется преимущественно в высокотехнологичных областях, таких как космические исследования, и пока не получил широкого коммерческого применения [30].

Помимо вышеупомянутых физических методов хранения водорода, еще одним вариантом является твердофазное хранение, которое осуществляется путем поглощения и адсорбции водорода твердыми материалами. Поглощение предполагает внедрение водорода непосредственно в объем материала с образованием химических соединений. Среди таких материалов особый интерес вызывают металлгидриды из-за их высокой способности к накоплению водорода. Например, палладий может поглощать водород в объеме, в 900 раз превышающем его собственный, при комнатной температуре и атмосферном давлении. Подробный обзор различных металлгидридных материалов можно найти в [28], а математические исследования моделирования процессов сорбции/десорбции в металлгидридных системах рассмотрены в [26].

Динамические модели системной симуляции были исследованы и моделируют процессы в металлгидридных хранилищах высокого давления и теплообмен в транспортных средствах [15, 16].

Для масштабного внедрения металлгидридов ведутся работы по снижению стоимости, оптимизации рабочей температуры и улучшению теплового управления системой [16].

Кроме того, существуют сложные гидриды (Mg₂NiH₄, LiAlH₄, NaBH₄ и др.) и химические гидриды (LiH, NaNH₂, CaH₂ и др.), которые хранят водород за счет поглощения. Однако основной проблемой этих методов является их необратимость и сложные реакции, необходимые для извлечения водорода. Еще одним способом хранения водорода является адсорбция, при которой водород физически удерживается пористыми материалами, такими как металлоорганические каркасы и углеродные материалы. Преимущество этого метода заключается в отсутствии необходимости в сложном управлении тепловыми процессами при зарядке и разрядке [16].

Однако технология хранения водорода с использованием физической адсорбции все еще далека от широкой коммерциализации, поскольку время заполнения хранилищ остается неудовлетворительным с учетом их емкости [30].

Водород играет важную роль в поддержке декарбонизации различных секторов, таких как промышленность, транспорт и энергетика. Предпринимаются активные усилия для

ускорения процесса превращения этого потенциала в реальность. Проведен краткий обзор ключевых технологий, способствующих интеграции водорода в энергетический сектор с точки зрения его производства и хранения. Особое внимание уделено системным приложениям в стационарных условиях, а также признан потенциал водорода для накопления и передачи энергии. Повышение уровня технологической готовности делает возможным развертывание крупных установок по производству возобновляемого водорода с помощью электролизеров в ближайшие годы.

Список литературы:

1. Dimitrakakis G. K., Tylianakis E., Froudakis G. E. Pillared graphene: a new 3-D network nanostructure for enhanced hydrogen storage // Nano letters. 2008. V. 8. №10. P. 3166-3170. <https://doi.org/10.1021/nl801417w>
2. Midilli A., Dincer I., Ay M. Green energy strategies for sustainable development // Energy policy. 2006. V. 34. №18. P. 3623-3633. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2005.08.003>
3. Nuttall W. J., Bakenne A. T., Nuttall W. J., Bakenne A. T. Towards a Hydrogen Economy // Fossil Fuel Hydrogen: Technical, Economic and Environmental Potential. 2020. P. 43-52. https://doi.org/10.1007/978-3-030-30908-4_4
4. Kordesch K., Simader G. Fuel cells and their applications. 1996.
5. T-Raissi A., Block D. L. Hydrogen: automotive fuel of the future // IEEE Power and Energy Magazine. 2004. V. 2. №6. P. 40-45. <https://doi.org/10.1109/MPAE.2004.1359020>
6. Mulder G., Hetland J., Lenaers G. Towards a sustainable hydrogen economy: Hydrogen pathways and infrastructure // International journal of hydrogen energy. 2007. V. 32. №0-11. P. 1324-1331. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2006.10.012>
7. Agnolucci P. Hydrogen infrastructure for the transport sector // International Journal of Hydrogen Energy. 2007. V. 32. №15. P. 3526-3544. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2007.02.016>
8. Smit R., Weeda M., De Groot A. Hydrogen infrastructure development in The Netherlands // International Journal of Hydrogen Energy. 2007. V. 32. №10-11. P. 1387-1395. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2006.10.044>
9. Ogden J. M. Developing an infrastructure for hydrogen vehicles: a Southern California case study // International Journal of Hydrogen Energy. 1999. V. 24. №8. P. 709-730. [https://doi.org/10.1016/S0360-3199\(98\)00131-1](https://doi.org/10.1016/S0360-3199(98)00131-1)
10. Turner J. A. Sustainable hydrogen production // Science. 2004. V. 305. №5686. P. 972-974. <https://doi.org/10.1126/science.1103197>
11. Исманов Ю. Х., Тынышов Т. Д. Улучшение характеристик интерферограмм, получаемых на выходе голографического интерферометра // X Международная конференция по фотонике и информационной оптике. 2021. С. 445-446.
12. Maripov A., Ismanov Y., Omyrzakov K. Four-channel wide-range holographic interferometer // Optical Measurement Systems for Industrial Inspection III. SPIE, 2003. V. 5144. P. 606-610. <https://doi.org/10.1117/12.501342>
13. Barbir F. PEM electrolysis for production of hydrogen from renewable energy sources // Solar energy. 2005. V. 78. №5. P. 661-669. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2004.09.003>
14. Ghenciu A. F. Review of fuel processing catalysts for hydrogen production in PEM fuel cell systems // Current opinion in solid state and materials science. 2002. V. 6. №5. P. 389-399. [https://doi.org/10.1016/S1359-0286\(02\)00108-0](https://doi.org/10.1016/S1359-0286(02)00108-0)
15. Grigoriev S. A., Poremsky V. I., Fateev V. N. Pure hydrogen production by PEM electrolysis for hydrogen energy // International journal of hydrogen energy. 2006. V. 31. №2. P. 171-175. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2005.04.038>

16. Marshall A., Børresen B., Hagen G., Tsyarkin M., Tunold R. Hydrogen production by advanced proton exchange membrane (PEM) water electrolyzers—Reduced energy consumption by improved electrocatalysis // *Energy*. 2007. V. 32. №4. P. 431-436. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2006.07.014>
17. Kalinci Y., Hepbasli A., Dincer I. Biomass-based hydrogen production: a review and analysis // *International journal of hydrogen energy*. 2009. V. 34. №21. P. 8799-8817. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2009.08.078>
18. Lindström B., Pettersson L. J. Hydrogen generation by steam reforming of methanol over copper-based catalysts for fuel cell applications // *International Journal of Hydrogen Energy*. 2001. V. 26. №9. P. 923-933. [https://doi.org/10.1016/S0360-3199\(01\)00034-9](https://doi.org/10.1016/S0360-3199(01)00034-9)
19. Lindström B., Agrell J., Pettersson L. J. Combined methanol reforming for hydrogen generation over monolithic catalysts // *Chemical engineering journal*. 2003. V. 93. №1. P. 91-101. [https://doi.org/10.1016/S1385-8947\(02\)00112-2](https://doi.org/10.1016/S1385-8947(02)00112-2)
20. Czernik S., French R., Feik C., Chornet E. Hydrogen by catalytic steam reforming of liquid byproducts from biomass thermoconversion processes // *Industrial & Engineering Chemistry Research*. 2002. V. 41. №17. P. 4209-4215. <https://doi.org/10.1021/ie020107q>
21. Maripov A., Ismanov Y. Interferometer based on the Talbot effect in holography // *Journal of optics*. 1995. V. 26. №1. P. 25. <https://doi.org/10.1088/0150-536X/26/1/004>
22. Исманов Ю. X. Восстановление изображения волнами различной длины // *Известия Национальной Академии наук Кыргызской Республики*. 2015. №4. С. 30-33.
23. Исманов Ю. X., Тынышова Т. Д. Уменьшение объема вводимых данных при компьютерной обработке интерферограмм // *VIII Международная конференция по фотонике и информационной оптике*. 2019. С. 695-696.
24. Shoko E., McLellan B., Dicks A. L., Da Costa J. D. Hydrogen from coal: Production and utilisation technologies // *International Journal of Coal Geology*. 2006. V. 65. №3-4. P. 213-222. <https://doi.org/10.1016/j.coal.2005.05.004>
25. Stiegel G. J., Ramezan M. Hydrogen from coal gasification: An economical pathway to a sustainable energy future // *International journal of coal geology*. 2006. V. 65. №3-4. P. 173-190. <https://doi.org/10.1016/j.coal.2005.05.002>
26. Clemens T., Gong D., Pearce S. Study on the suitability of New Zealand coals for hydrogen production // *International journal of coal geology*. 2006. V. 65. №3-4. P. 235-242. <https://doi.org/10.1016/j.coal.2005.05.006>
27. Neef H. J. International overview of hydrogen and fuel cell research // *Energy*. 2009. V. 34. №3. P. 327-333. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2008.08.014>
28. Balat M. Potential importance of hydrogen as a future solution to environmental and transportation problems // *International journal of hydrogen energy*. 2008. V. 33. №15. P. 4013-4029. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2008.05.047>
29. Fatsikostas A. N., Kondarides D. I., Verykios X. E. Production of hydrogen for fuel cells by reformation of biomass-derived ethanol // *Catalysis Today*. 2002. V. 75. №1-4. P. 145-155. [https://doi.org/10.1016/S0920-5861\(02\)00057-3](https://doi.org/10.1016/S0920-5861(02)00057-3)
30. Miceli R. Energy management and smart grids // *Energies*. 2013. V. 6. №4. P. 2262-2290. <https://doi.org/10.3390/en6042262>

References:

1. Dimitrakakis, G. K., Tylianakis, E., & Froudakis, G. E. (2008). Pillared graphene: a new 3-D network nanostructure for enhanced hydrogen storage. *Nano letters*, 8(10), 3166-3170. <https://doi.org/10.1021/nl801417w>

2. Midilli, A., Dincer, I., & Ay, M. (2006). Green energy strategies for sustainable development. *Energy policy*, 34(18), 3623-3633. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2005.08.003>
3. Nuttall, W. J., Bakenne, A. T., Nuttall, W. J., & Bakenne, A. T. (2020). Towards a Hydrogen Economy. *Fossil Fuel Hydrogen: Technical, Economic and Environmental Potential*, 43-52. https://doi.org/10.1007/978-3-030-30908-4_4
4. Kordesch, K., & Simader, G. (1996). Fuel cells and their applications.
5. T-Raissi, A., & Block, D. L. (2004). Hydrogen: automotive fuel of the future. *IEEE Power and Energy Magazine*, 2(6), 40-45. <https://doi.org/10.1109/MPAE.2004.1359020>
6. Mulder, G., Hetland, J., & Lenaers, G. (2007). Towards a sustainable hydrogen economy: Hydrogen pathways and infrastructure. *International journal of hydrogen energy*, 32(10-11), 1324-1331. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2006.10.012>
7. Agnolucci, P. (2007). Hydrogen infrastructure for the transport sector. *International Journal of Hydrogen Energy*, 32(15), 3526-3544. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2007.02.016>
8. Smit, R., Weeda, M., & De Groot, A. (2007). Hydrogen infrastructure development in The Netherlands. *International Journal of Hydrogen Energy*, 32(10-11), 1387-1395. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2006.10.044>
9. Ogden, J. M. (1999). Developing an infrastructure for hydrogen vehicles: a Southern California case study. *International Journal of Hydrogen Energy*, 24(8), 709-730. [https://doi.org/10.1016/S0360-3199\(98\)00131-1](https://doi.org/10.1016/S0360-3199(98)00131-1)
10. Turner, J. A. (2004). Sustainable hydrogen production. *Science*, 305(5686), 972-974. <https://doi.org/10.1126/science.1103197>
11. Ismanov, Yu. Kh., & Tynyshov, T. (2021). Uluchshenie kharakteristik interferogramm, poluchaemykh na vykhode golograficheskogo interferometra. In *X Mezhdunarodnaya konferentsiya po fotonike i informatsionnoi optike* (pp. 445-446). (in Russian).
12. Maripov, A., Ismanov, Y., & Omyrzakov, K. (2003, May). Four-channel wide-range holographic interferometer. In *Optical Measurement Systems for Industrial Inspection III* (Vol. 5144, pp. 606-610). SPIE. <https://doi.org/10.1117/12.501342>
13. Barbir, F. (2005). PEM electrolysis for production of hydrogen from renewable energy sources. *Solar energy*, 78(5), 661-669. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2004.09.003>
14. Ghenciu, A. F. (2002). Review of fuel processing catalysts for hydrogen production in PEM fuel cell systems. *Current opinion in solid state and materials science*, 6(5), 389-399. [https://doi.org/10.1016/S1359-0286\(02\)00108-0](https://doi.org/10.1016/S1359-0286(02)00108-0)
15. Grigoriev, S. A., Porembsky, V. I., & Fateev, V. N. (2006). Pure hydrogen production by PEM electrolysis for hydrogen energy. *International journal of hydrogen energy*, 31(2), 171-175. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2005.04.038>
16. Marshall, A., Børresen, B., Hagen, G., Tsyarkin, M., & Tunold, R. (2007). Hydrogen production by advanced proton exchange membrane (PEM) water electrolyzers — Reduced energy consumption by improved electrocatalysis. *Energy*, 32(4), 431-436. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2006.07.014>
17. Kalinci, Y., Hepbasli, A., & Dincer, I. (2009). Biomass-based hydrogen production: a review and analysis. *International journal of hydrogen energy*, 34(21), 8799-8817. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2009.08.078>
18. Lindström, B., & Pettersson, L. J. (2001). Hydrogen generation by steam reforming of methanol over copper-based catalysts for fuel cell applications. *International Journal of Hydrogen Energy*, 26(9), 923-933. [https://doi.org/10.1016/S0360-3199\(01\)00034-9](https://doi.org/10.1016/S0360-3199(01)00034-9)

19. Lindström, B., Agrell, J., & Pettersson, L. J. (2003). Combined methanol reforming for hydrogen generation over monolithic catalysts. *Chemical engineering journal*, 93(1), 91-101. [https://doi.org/10.1016/S1385-8947\(02\)00112-2](https://doi.org/10.1016/S1385-8947(02)00112-2)
20. Czernik, S., French, R., Feik, C., & Chornet, E. (2002). Hydrogen by catalytic steam reforming of liquid byproducts from biomass thermoconversion processes. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 41(17), 4209-4215. <https://doi.org/10.1021/ie020107q>
21. Maripov, A., & Ismanov, Y. (1995). Interferometer based on the Talbot effect in holography. *Journal of optics*, 26(1), 25. . <https://doi.org/10.1088/0150-536X/26/1/004>
22. Ismanov, Yu. Kh. (2015). Vosstanovlenie izobrazheniya volnami razlichnoi dliny. *Izvestiya Natsional'noi Akademii nauk Kyrgyzskoi Respubliki*, (4), 30-33. (in Russian).
23. Ismanov, Yu. Kh., & Tynyshova, T. D. (2019). Umen'shenie ob'ema vvodimykh dannykh pri komp'yuternoi obrabotke interferogramm. In *VIII Mezhdunarodnaya konferentsiya po fotonike i informatsionnoi optike* (pp. 695-696). (in Russian).
24. Shoko, E., McLellan, B., Dicks, A. L., & Da Costa, J. D. (2006). Hydrogen from coal: Production and utilisation technologies. *International Journal of Coal Geology*, 65(3-4), 213-222. <https://doi.org/10.1016/j.coal.2005.05.004>
25. Stiegel, G. J., & Ramezan, M. (2006). Hydrogen from coal gasification: An economical pathway to a sustainable energy future. *International journal of coal geology*, 65(3-4), 173-190. <https://doi.org/10.1016/j.coal.2005.05.002>
26. Clemens, T., Gong, D., & Pearce, S. (2006). Study on the suitability of New Zealand coals for hydrogen production. *International journal of coal geology*, 65(3-4), 235-242. <https://doi.org/10.1016/j.coal.2005.05.006>
27. Neef, H. J. (2009). International overview of hydrogen and fuel cell research. *Energy*, 34(3), 327-333. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2008.08.014>
28. Balat, M. (2008). Potential importance of hydrogen as a future solution to environmental and transportation problems. *International journal of hydrogen energy*, 33(15), 4013-4029. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2008.05.047>
29. Fatsikostas A. N., Kondarides D., Verykios X. E. Production of hydrogen for fuel cells by reformation of biomass-derived ethanol. *Catal. Today*. 2012. V. 75. No. 1e4. P.145e55. [https://doi.org/10.1016/S0920-5861\(02\)00057-3](https://doi.org/10.1016/S0920-5861(02)00057-3)
30. Miceli, R. (2013). Energy management and smart grids. *Energies*, 6(4), 2262-2290. <https://doi.org/10.3390/en6042262>

Работа поступила
в редакцию 16.04.2025 г.

Принята к публикации
22.04.2025 г.

Ссылка для цитирования:

Исманов Ю. Х., Джаманкызов Н. К., Тынышова Т. Д., Кайназаров А. Т. Некоторые технологические аспекты получения и хранения водорода // Бюллетень науки и практики. 2025. Т. 11. №6. С. 105-115. <https://doi.org/10.33619/2414-2948/115/15>

Cite as (APA):

Ismanov, Y., Dzhamankizov, N., Tynyshova, T., & Kainazarov, A. (2025). Some Technological Aspects of Hydrogen Production and Storage. *Bulletin of Science and Practice*, 11(6), 105-115. (in Russian). <https://doi.org/10.33619/2414-2948/115/15>