УДК 620.93
DOI: 10.34031/ES.2026.3.09

Секция
Альтернативные и возобновляемые источники энергии

# ОБЗОР СОВРЕМЕННЫХ МЕТОДОВ ПРОИЗВОДСТВА И ХРАНЕНИЯ ВОДОРОДА И ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ВОДОРОДА В КАЧЕСТВЕ УСТОЙЧИВОГО ИСТОЧНИКА ЭНЕРГИИ

**Пезешки З.[1], Султангузин И.А.[1], Канунников О.В.[2]**

*[1] ФГБОУ ВО "НИУ "МЭИ", г. Москва, Россия*
*[2] ООО «Термомеханика», г. Красноярск, Россия*

***Аннотация***

*В настоящее время увеличивается актуальность обеспечения человечества устойчивой энергией. Опасения по поводу изменения климата, вызванного сжиганием ископаемого топлива, приводят к необходимости использования альтернативных источников энергии. В мире все еще есть регионы, которые сталкиваются со многими проблемами в обеспечении себя энергией. Возобновляемые источники, такие как солнце, ветер и биомасса, являются первыми предложенными вариантами устойчивого энергоснабжения. Эти источники, наряду с технологией водорода и топливными элементами, обладают высокой эффективностью преобразования. Данные источники позволяют вырабатывать электрическую и тепловую энергию. Но эти ресурсы также имеют несколько ограничений из-за зависимости от окружающей среды и климатических условий. Например, солнечную энергию можно использовать только в дневное время, когда есть солнце. Среди решений в сфере безуглеродной энергетики, водород считается лучшим вариантом для обеспечения устойчивой энергетики из-за обилия и разнообразия источников производства. Когда мы говорим об устойчивом энергоснабжении, мы имеем в виду производство, хранение и передачу энергии, где водород выступает перспективным энергоносителем для генерации электроэнергии и тепла в коммунально-бытовом секторе и на транспорте благодаря высокой удельной энергоемкости и низкого уровня выбросов загрязняющих веществ. В настоящее время более 90% мирового водорода производится из ископаемого углеводородного сырья и угля, таких как природный газ, уголь и нефть, большая часть которых используется как сырье нефтеперерабатывающих заводов, химического производства и других отраслей промышленности, в том числе сталелитейной. По данным Международного агентства по атомной энергии (МАГАТЭ), мировой спрос на водород в настоящее время превышает 100 миллионов тонн в год. В исследовании рассматриваются процессы, связанные с производством и хранением водорода.*

***Ключевые слова:*** *ископаемое топливо, возобновляемое топливо, производство водорода, хранение водорода, передача водорода, топливный элемент.*

# AN OVERVIEW OF MODERN METHODS FOR HYDROGEN PRODUCTION AND STORAGE AND HYDROGEN USE AS A SUSTAINABLE ENERGY SOURCE

**Zahra Pezeshki[1], Ildar Sultanguzin[1], Oleg Kanunnikov[2]**

*[1] National Research University "Moscow Power Engineering Institute", Moscow, Russia*
*[2] Thermomechanics LLC, Krasnoyarsk, Russia*

***Abstract***

*Ensuring a sustainable energy supply for humanity is becoming increasingly important. Concerns about climate change caused by the burning of fossil fuels are driving the need to use alternative energy sources. There are still regions around the world that face many challenges in securing their energy needs. Renewable sources, such as solar, wind, and biomass, are the primary options proposed for sustainable energy supply. These sources, along with hydrogen technology and fuel cells, offer high conversion efficiency. They can be used to generate both electricity and heat. However,*

*these resources also have several limitations due to their dependence on the environment and climatic conditions. For example, solar energy can only be used during the day when the sun is shining. Among solutions in the field of carbon-free energy, hydrogen is considered the best option for ensuring a sustainable energy supply due to the abundance and diversity of its production sources. When we talk about a sustainable energy supply, we mean the production, storage, and transmission of energy, where hydrogen serves as a promising energy carrier for generating electricity and heat in the residential and commercial sectors and in transportation, thanks to its high energy density and low pollutant emissions. Currently, more than 90% of the world's hydrogen is produced from fossil hydrocarbon feedstocks and coal, such as natural gas, coal, and oil, most of which are used as feedstocks in oil refineries, chemical plants, and other industries, including steelmaking. According to the International Atomic Energy Agency (IAEA), global demand for hydrogen currently exceeds 100 million metric tons per year. This study examines the processes involved in hydrogen production and storage.*

***Keywords:*** *fossil fuels, renewable fuels, hydrogen production, hydrogen storage, hydrogen transfer, fuel cell.*

## Введение

К числу традиционных и невозобновляемых источников энергии относятся древесина, уголь, нефть и природный газ, которые жители планеты используют уже много лет [1]. На ископаемое топливо в настоящее время приходится более 80% мирового энергопотребления, однако его запасы неуклонно истощаются [2]. Таким образом, сегодня одной из проблем является поиск альтернативных видов топлива с низким содержанием загрязняющих веществ и экологически чистых [3]. Но остаются две другие проблемы: 1) экологическая безопасность этих видов топлива и 2) их приемлемая стоимость [4]. Сегодня возобновляемые источники энергии, такие как солнечная и ветровая, составляют наибольшую долю возобновляемых ресурсов, и их развитие считается необходимым [5]. Для максимального использования этих источников энергии такие технологии, как электролиз для получения водорода и топливные элементы для преобразования водорода в электричество и тепло, известны как чистые технологии. В настоящее время около 81-86% первичных источников энергии и 60% выработки электроэнергии основаны на сжигании ископаемого топлива, и увеличение выбросов $CO_2$ представляет серьёзную угрозу для климатической системы (усугубляет изменение климата) [6-8]. Таким образом, водород может быть альтернативным топливом. Водород используется для очистки природного газа от серы, в синтезе аммиака и метанола в нефтехимической промышленности, входит в состав дезинфицирующих средств в медицине, используется для гидрогенизации растительных масел в пищевой промышленности, в качестве топлива для ракетных двигателей, в качестве охлаждающей жидкости для электрогенераторов, при переработке пластика, в качестве топлива для топливных элементов (ТЭ) [4, 9-12].

## Что такое водород?

Водород – это горючий газ, который не имеет цвета и запаха. Технические характеристики водорода приведены в табл. 1.

Газообразный водород – один из самых распространенных и легких элементов во Вселенной, на его долю приходится около 75% барионной массы всей Вселенной и более 90% атомов космоса. Вся энергия солнца и звезд вырабатывается за счет ядерного синтеза водорода и превращения его в гелий. На водород приходится 75% массы звезд.

Водород имеет атомный номер один и атомную массу 1,008, а также один электрон в своей валентной оболочке. Молекула воды, состоящая из двух атомов водорода и одного атома кислорода, в химической номенклатуре называется монооксидом диводорода» (или оксидом водорода).

Таблица 1

**Технические характеристики водорода**

| Параметр | Водород |
|---|---|
| Низшая низшая теплота сгорания, МДж/кг (МДж/м³) | 120 (10,79) |
| Плотность при нормальных условиях, кг/м³ или г/л | 0,0899 |
| Объемная доля топлива в стехиометрической смеси с воздухом, % | 29,6 |
| Минимальная энергия зажигания, мДж | около 0,02 |
| Нормальная скорость горения, м/с | 1,8 |
| Температура самовоспламенения, °C | 510 ...590 |
| Пределы воспламеняемости в смеси с воздухом | 4-75% (очень высокая взрывоопасность) |
| Температура плавления, °C | -259,19 |
| Температура кипения, °C | -252,879 |

Атомы водорода в воде имеют положительный частичный электрический заряд ($\delta^+$), а атом кислорода имеет отрицательный электрический заряд ($\delta^-$). Из-за наличия двух неподелённых электронных пар у атома кислорода молекула воды имеет угловую (V-образную) форму с валентным углом (угол между связями O–H) 104,5° (рис. 1).

Газообразный водород может быть извлечен из воды с помощью 4 технологий: электролиза, фотокатализа, радиолиза и термолиза [13].

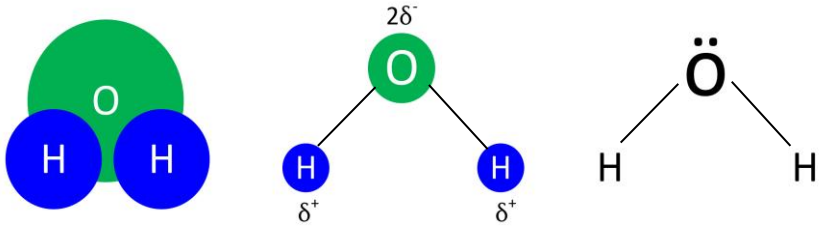



**Рис. 1. V-образная структура молекулы воды**

Водород имеет три изотопа: протий ($^1$H) – один протон и не содержит нейтронов, дейтерий ($^2$H) – один протон и один нейтрон, тритий ($^3$H) – один протон и два нейтрона, который является радиоактивным с периодом полураспада более 12 лет. Из них протий является наиболее распространенным изотопом (99,98%), дейтерий – стабильным изотопом, а тритий – нестабильным изотопом водорода. Водород известен как самый легкий газ и обладает наибольшим количеством энергии на единицу веса среди всех существующих видов топлива [12, 14, 15]. В табл. 2 представлена краткая информация об атомном составе изотопов водорода.

Таблица 2

**Атомная информация об изотопах водорода**

| Характеристики | Протий | Дейтерий | Тритий |
|---|---|---|---|
| Атомная масса | 1 | 2,01 | 3,01 |
| Естественная распространенность (%) | 99,98 | 0,01 | $\approx 10^{-18}$ |
| Период полураспада, лет | - | - | 12,26 |
| Энергия ионизации | 13,59 | 13,60 | 13,60 |
| Сечение тепловых нейтронов, барн ($\times 10^{-24}$см²) | 0,32 | $0{,}51 \times 10^{-2}$ | $< 6 \times 10^{-6}$ |
| Ядерный спин | $+\frac{1}{2}$ | +1 | $+\frac{1}{2}$ |
| Ядерный магнитный момент (ядерный магнетон $\mu_N$) | +2,79 | +0,85 | +2,97 |

## Способы производства водорода

Существует несколько способов получения водорода, и водород, полученный в результате этих процессов, классифицируется в соответствии с разными цветами. Схема этих процессов показана на рис. 2.

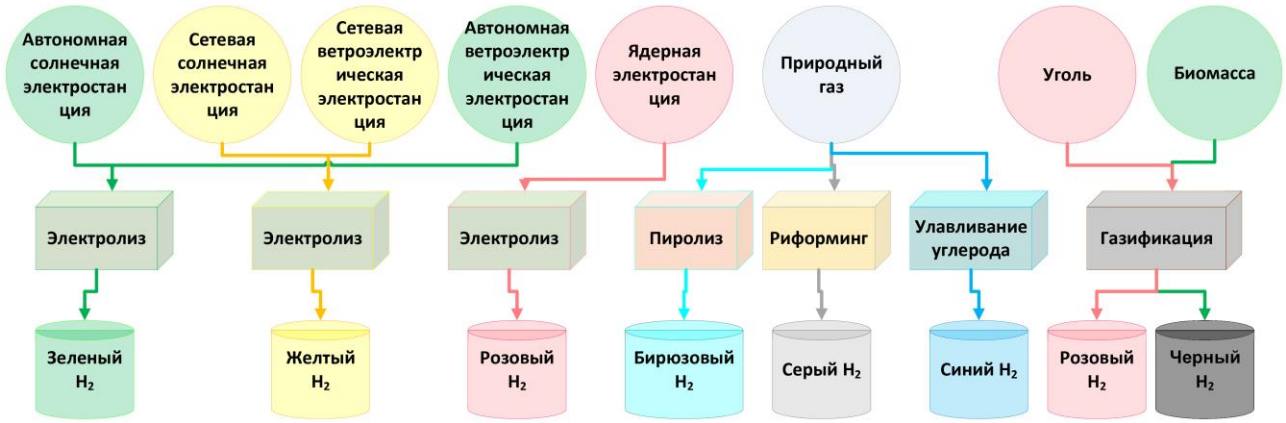



**Рис. 2. Классификация производства водорода**

1. Зеленый водород. Получают из возобновляемой энергии солнца и ветра в процессе электролиза. В этом процессе используются автономные ветровые и солнечные электростанции. Зеленый водород также может быть получен путем газификации биомассы [16,17].

2. Желтый водород. Получают электролизом с использованием энергии солнца и ветра от сетевых электростанций, в отличие от зелёного водорода, для которого используют автономные установки [16-18].

3. Розовый водород. Получают электролизом воды с использованием электроэнергии атомных электростанций (АЭС) [19-23].

4. Бирюзовый водород. Получают термическим разложением (пиролизом) метана (природного газа) с образованием твердого углерода в отсутствие кислорода, в некоторых схемах – с участием $H_2S$ [24].

5. Серый водород. Получают риформингом углеводородов природного газа, прежде всего метана [25-27].

6. Синий водород. Водород, получаемый из природного газа при улавливании и хранении $CO_2$ [28].

7. Чёрный или бурый. Получаемый газификацией угля или остатков тяжелой нефти [19-23].

Далее описаны процессы электролиза, газификации, риформинга, пиролиза и улавливания углерода.

## Электролиз

Во время электролиза молекула воды ($H_2O$) распадается на водород ($H_2$) и кислород ($O_2$) под действием электрического тока. Вся реакция этого процесса включает в себя полное изменение энтальпии, $\Delta H$, кДж/моль, включая энергию Гиббса, $\Delta G$, кДж/моль, которая является минимальной энергией, требуемой в идеальных условиях, и тепловую энергию, получаемую в результате изменения энтальпии, $T\Delta S$, кДж/моль:

$$\Delta H = \Delta G + T\Delta S. \quad (1)$$

В получении водорода электролизом важную роль играют плотность тока и напряжение ячейки [29, 30]. Процесс электролиза осуществляется в 4 формах:

1) фотоэлектрохимической;

2) с использованием щелочной;

3) с использованием протонообменной мембраны (ПЭМ);

4) с использованием высокотемпературного электролиза водяного пара (ВТЭ/SOEC).

Среди них наибольшей эффективностью преобразования обладают ВТЭ (близко к 100%) и ПЭМ (80-90%). Процесс электролиза, осуществляемый с помощью катализаторов электролизеров, требует двух реакций: реакции выделения кислорода (РВК) и реакции выделения водорода (РВВ):

$$\text{РВВ (катод):} \qquad 2H^+ + 2e^- \rightarrow H_2 \tag{2}$$

$$\text{РВК (анод):} \qquad 2H_2O \rightarrow O_2 + 4H^+ + 4e^- \tag{3}$$

Вышеупомянутые две реакции связаны с процессом электролиза с использованием ПЭМ, и эти две реакции различаются в разных процессах электролиза [13] (рис. 3).

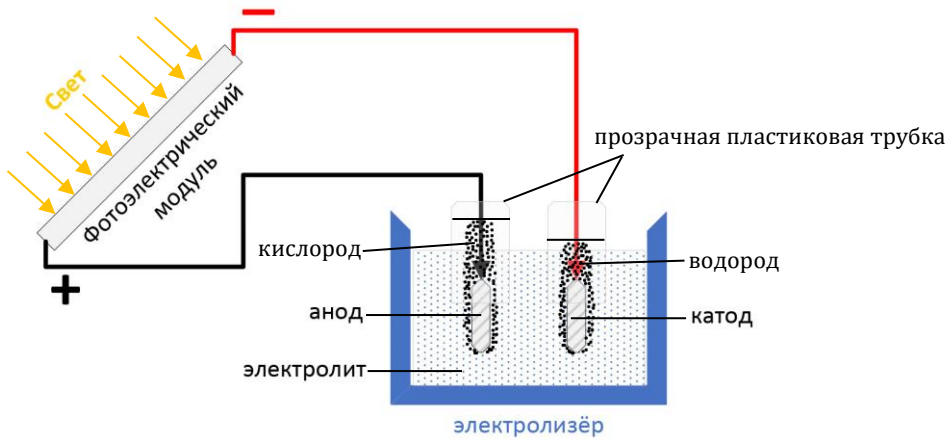



**Рис. 3. Электролиз**

К недостаткам этой технологии относится высокая стоимость солнечных панелей и электролизеров. Зеленый водород может быть использован в таких чувствительных отраслях, как медицина, фармацевтика и пищевая промышленность, благодаря своей высокой чистоте [31].

## Газификация

Получение водорода из биомассы осуществляется с помощью процессов электролиза непосредственно с помощью микробиологических электролизных ячеек и косвенно путем сочетания газификации с электролизом воды. Эти методы значительно снижают потребление электроэнергии по сравнению с электролизом чистой воды за счет более низкого напряжения (0,1-0,5 В против 1,23 В). В этом способе вместо получения газообразного кислорода на аноде органические материалы или производные биомассы (такие как лигнин, целлюлоза, глицерин или органические сточные воды) окисляются, и на катоде выделяется чистый водород [32].

При производстве водорода используется биогаз из сельскохозяйственных отходов и отбросов, который в основном состоит из метана. В способе используются твердооксидные электролизеры и одновременный электролиз водяного пара и диоксида углерода при высоких температурах (700-850 °C), а биогаз подвергается процессу риформинга одновременно с электролизом и преобразуется непосредственно в водород и синтез-газ [32, 33] (рис. 4).

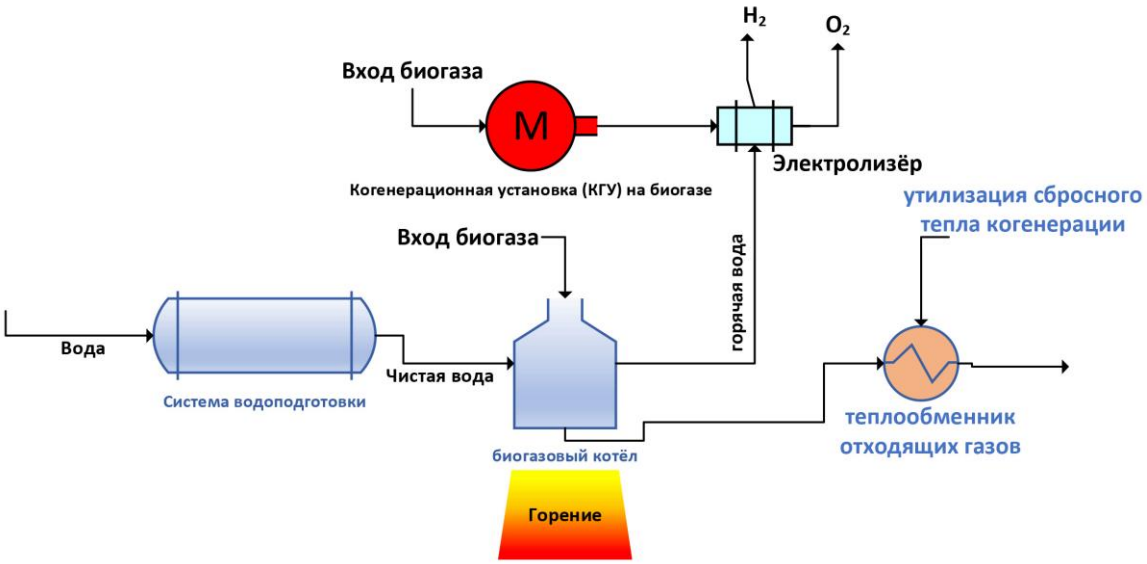



**Рис. 4. Газификация биогаза**

Превращение угля в водород путем газификации также является промышленным процессом, при котором углерод, содержащийся в угле, преобразуется в синтез-газ (комбинацию монооксида углерода и водорода), и в ходе дополнительных реакций получается чистый водород. В этом процессе сначала измельченный уголь нагревают при высоких температурах, обычно от 700 до 1000°C, методом частичного окисления с контролируемым количеством воды и пара, и получают синтез-газ, включая монооксид углерода (CO) и $H_2$, без полного сгорания. Затем образующийся монооксид углерода вступает в реакцию с водяным паром и превращается в $CO_2$ и водород.

$$CO + H_2O \rightarrow CO_2 + H_2 \quad (4)$$

Затем в процессе очистки выделяются газообразные примеси, соединения серы и диоксид углерода для получения водорода высокой чистоты.

Одной из проблем, связанных с этим методом, является выделение большого количества углекислого газа [34].

## Риформинг

Паровой риформинг метана осуществляется при высокой температуре, составляющей около 800-900°C. Наиболее распространенным и экономичным способом получения газообразного водорода является паровой риформинг метана, в основном из природного газа [35]. Процесс парового риформинга метана заключается в следующем:

$$CH_4 + H_2O \rightleftarrows CO + 3H_2 \quad (5)$$

В качестве катализатора используется никель. Поступающий природный газ проходит тщательную очистку от соединений серы во избежание отравления и дезактивации катализатора. Недостатком этого процесса является образование углеродистых отложений, называемых коксом, на поверхности катализатора, что инактивирует катализатор и снижает эффективность процесса [36] (рис. 5).

## Пиролиз

Пиролиз, или термическое разложение соединений природного газа и нефти, таких как метан ($CH_4$), углеводороды и сероводород ($H_2S$), – это процесс, при котором эти соединения разлагаются на газообразный водород, твердый углерод и кокс в отсутствие кислорода и при высоких температурах без образования углекислого газа $CO_2$.

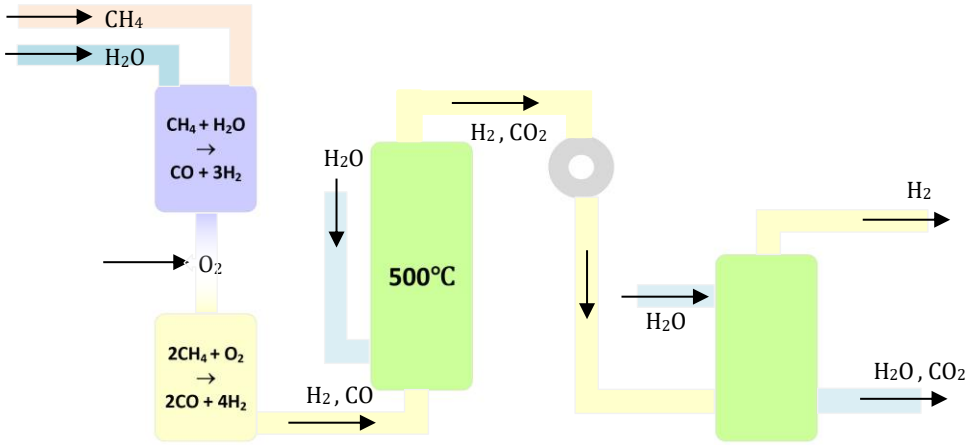



**Рис. 5. Паровой риформинг метана**

В этом методе молекулы метана получают тепловую или плазменную энергию для разрушения прочных связей между углеродом и водородом (рис. 6).

$$CH_4 \rightarrow C(\text{твёрдый углерод}) + 2H_2 \qquad (6)$$

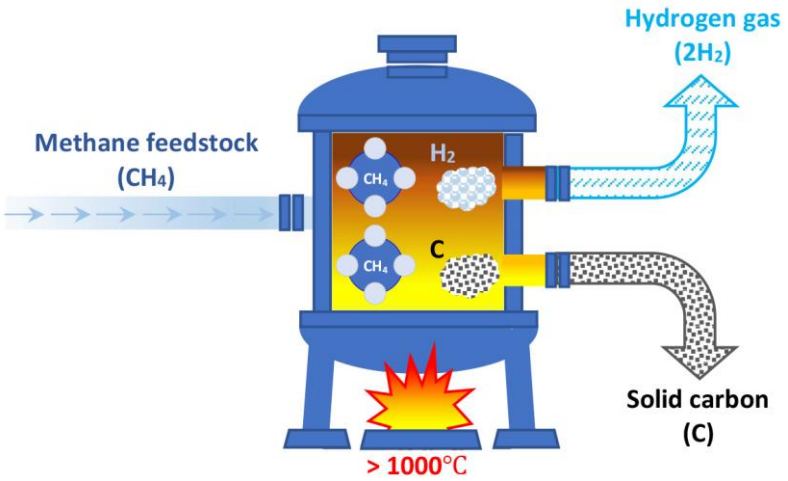



**Рис. 6. Пиролиз метана**

В то же время $H_2S$ является одним из соединений, выбросы которого и отсутствие очистки приводят к экологическим проблемам. Это соединение может влиять на качество воздуха и вызывать кислотные дожди. Термическое разложение осуществляется для расщепления $H_2S$ при высоких температурах, около 1000°C [37, 38].

$$H_2S \rightarrow H_2 + S \ \text{(твёрдая или жидкая)} \qquad (7)$$

$$\Delta H = \Delta G + T\Delta S \approx 33{,}3 + 298 \times 0{,}0204 = 39{,}4 \text{ кДж/моль} \qquad (8)$$

## Улавливание углерода

Использование технологии улавливания углерода (carbon capture and storage) в процессе производства водорода приводит к получению водорода, называемого голубым водородом. В этом процессе, благодаря установке систем улавливания углерода на установках по производству водорода, $CO_2$, образующийся в процессе, собирается перед попаданием в атмосферу, сжимается и закачивается глубоко в недра земли (например,

в осушенные нефтяные и газовые резервуары или пласты с соленой водой). Процесс производства голубого водорода дешевле и более достижим в промышленных масштабах по сравнению с «зеленым» водородом, что позволяет промышленным предприятиям использовать существующие запасы природного газа и одновременно достигать целей по сокращению выбросов углекислого газа. Однако одной из проблем этой технологии является ее высокая стоимость, поскольку строительство, техническое обслуживание и ввод в эксплуатацию установок для поглощения, разделения и впрыска $CO_2$ требуют огромных инвестиций и дополнительных энергозатрат [39] (рис. 7).

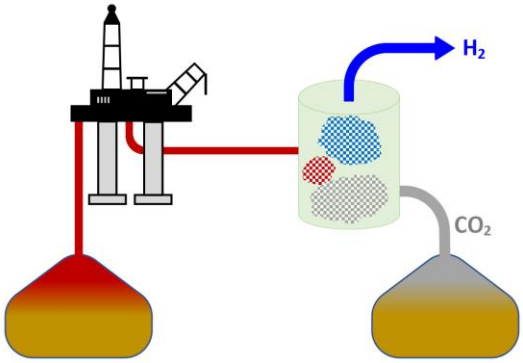



**Рис. 7. Улавливание углерода**

## Производство водорода в России

Более 90% водорода, производимого в мире, используется в качестве химического продукта (55% – в производстве аммиака, 25% – на нефтеперерабатывающих заводах, 10% – в производстве метанола и для других промышленных целей), и менее 10% используется в качестве топлива. Это означает, что 90% производимого водорода используется на том же производственном участке и не поступает на рынок. На нефтеперерабатывающих заводах основная часть производимого водорода также используется для переработки и производства других продуктов[12]. В настоящее время производство водорода в России оценивается экспертами в 5,5 млн т в год, который потребляется в основном при производство аммиака [40]. По данным работ [40] потенциал спроса на водород в российской металлургии составляет 3,5 млрд т/в год, на транспорте – 14,69 млрд т/в год, но, как отмечают авторы, полная реализация потенциала спроса на водород на практике маловероятна.

На рис. 8 показана стоимость водорода в расчете на килограмм водорода при различных технологиях [41].




**Рис. 8. Стоимость водорода за килограмм для различных технологий в России**

## Технологии хранения водорода

Водород (в связанном виде) является одним из наиболее распространенных элементов на Земле, но в свободном виде он практически не встречается. Водород является одним из основных вариантов замены ископаемого топлива. Следовательно, необходимо создать условия для хранения этого экологически чистого источника энергии. На рис. 9 показаны распространенные технологии в области хранения водорода [42, 43].

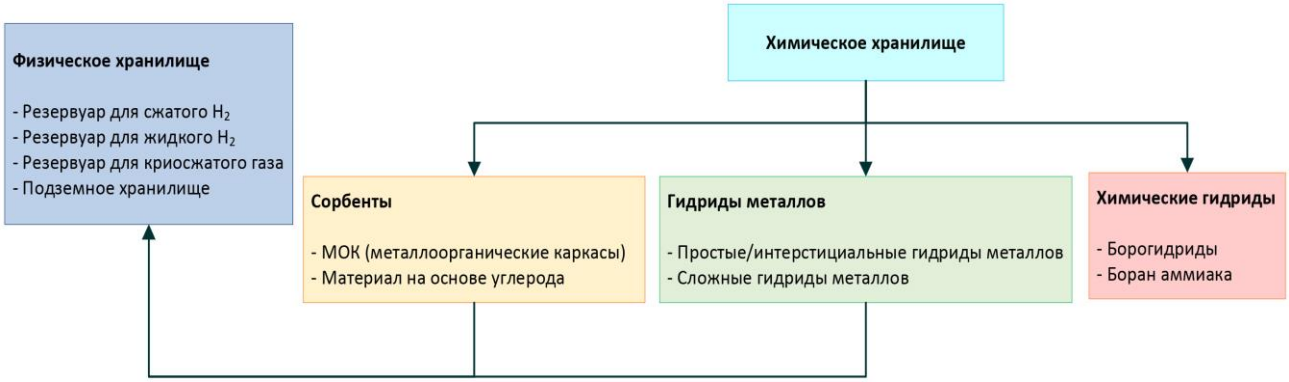



**Рис. 9. Технологии хранения водорода**

Наиболее экономичным из всех этих методов являются Металлогидридный способ хранения. На рис. 10 показано сравнение объема водорода при различных методах хранения.

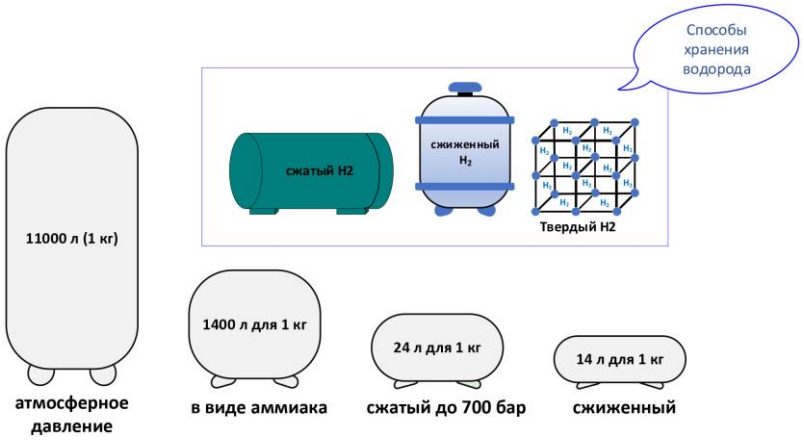



**Рис. 10. Объём одного килограмма водорода в различных состояниях**

## Сжижение водорода

Сжижение водорода – это процесс, при котором газообразный водород охлаждается до очень низких температур (около -252°C или 20К), при которых он становится жидким. Плотность жидкого водорода составляет около 0,071 кг/л, что значительно превышает плотность сжатого газа при давлении 70 МПа (около 0,039–0,040 кг/л). Для поддержания низкой температуры резервуары хорошо изолируются. Такой водород используется в аэрокосмической промышленности и производстве ракетного топлива, экологически чистых транспортных средствах и крупномасштабных хранилищах. Сложность этого метода заключается в высокой стоимости оборудования, низкой термодинамической эффективности и необходимости использования двойных изолированных резервуаров (криогенных установок) для предотвращения испарения [44].

Методы сжижения водорода включают:

1) эффект Джоуля-Томсона с предварительным охлаждением;

2) использование адиабатического расширения с механической работой (турбина расширения) для достижения более низких температур;

3) использование гибридной системы, использующей вспомогательные циклы, такие как предварительное охлаждение жидким азотом или гелием, для повышения эффективности.

**Сжатие водорода**

Хранение сжатого водорода является одним из наиболее распространенных физических методов хранения этого элемента. При этом способе газообразный водород сжимается с помощью компрессоров и хранится в специальных резервуарах. Рабочее давление обычно составляет от 35 до 70 МПа. Сжатие широко используется в автомобилях на водороде, автомобилях на топливных элементах и в промышленности. Из-за высокой устойчивости к давлению резервуары данного типа должны изготавливаться из многослойных и композитных материалов (с полимерным или металлическим внутренним слоем и покрытием из углеродных волокон), чтобы обладать необходимой прочностью и небольшим весом. Преимущества этого метода заключаются в быстром доступе и заправке, пригодных для транспортировки по коротким маршрутам. Недостатком метода является то, что водород имеет меньшую объемную плотность энергии, чем жидкий водород, и требует большого количества электроэнергии для процесса сжатия, обеспечения безопасности и постоянного контроля для предотвращения утечек [12].

Для хранения водорода можно использовать четыре типа резервуара высокого давления [12, 45]:

Тип I – цельнометаллические резервуары высокого давления: эти типы резервуаров являются самыми обычными, дешевыми и в то же время самыми тяжелыми. Эти резервуары обычно изготавливаются из алюминия или стали и выдерживают давление до 50 МПа.

Тип II – стеклопластиковый композитный баллон высокого давления: сталь и композитные материалы имеют одинаковую нагрузку на конструкцию. Резервуары этого типа почти на 50% дороже в изготовлении, чем резервуары первого типа, но имеют самый высокий допуск по давлению.

Тип III –композитный корпус с металлической втулкой: композитная конструкция выдерживает основную нагрузку на конструкцию, а для герметизации используется алюминиевая втулка. Эти типы резервуаров имеют 5%-ную механическую нагрузку на резервуар и могут использоваться при рабочем давлении 45 МПа.

Тип IV – полностью композитный: в качестве изоляции обычно используется полимер, такой как полиэтилен высокой плотности, а для несущих конструкций используются композиты из углеродного волокна или углеродного стекла. Эти типы резервуаров легки, но дороги и выдерживают давление до 100 МПа.

**Хранение с использованием химических гибридов**

Этот метод является одним из методов твердого химического хранения водорода, при котором атомы водорода связаны ковалентным или ионным способом с легкими элементами (такими как алюминий, бор и азот) и щелочными металлами (такими как натрий, литий и магний). При хранении водорода методом комплексных гидридов массовая плотность и объем водорода используются в гидриде натрия и алюмогидриде лития с массовым содержанием водорода 4,2% и 10,5%. Это один из наиболее успешных методов хранения водорода [46].

Основными соединениями гидридных комплексов являются аланиты (такие как аланит натрия, $NaAlH_4$) и борогидриды (такие как борогидрид натрия, $NaBH_4$, и борогидрид лития, $LiBH_4$).

$$3NaAlH_4 \rightleftharpoons Na_3AlH_6 + 2Al + 3H_2 \quad (9)$$

$$3NaAlH_4 \rightleftharpoons 3NaH + 3Al + \frac{3}{2}H_2 \quad (10)$$

Преимущества этого метода заключаются в хранении больших количеств водорода в меньших объемах благодаря высокой вместимости при давлении и температуре окружающей среды, и, в отличие от других методов, таких как сжатие и сжижение, не создает риска взрыва, вызванного высоким давлением. Кроме того, запасенный водород не разряжается сам по себе, в отличие от аккумуляторов.

Сложность этого метода заключается в том, что для выделения водорода требуется нагревание при высоких температурах. Процесс реабсорбции водорода также протекает медленно и требует высокого давления и температуры. Поэтому для повышения скорости абсорбции обычно используются добавки и катализаторы, такие как соединения титана ($TiCl_3$).

**Металлогидридный способ хранения**

Гидрид металла является одним из самых безопасных и компактных методов химического хранения водорода в твердом состоянии. В этом методе газообразный водород соединяется со структурой кристаллической решетки металла или металлического сплава, образуя слабую химическую связь (химическая абсорбция или обратимая реакция). Водород, содержащийся в гидриде, затем высвобождается водой, а гидриды лития и натрия, используемые в качестве материалов для хранения, также вступают в реакцию с выделением водорода с водой.

$$M(\text{гидрид металла}) + \frac{3}{2}H_2 \rightleftharpoons MH_x(\text{экзотермический}) + \text{Нагрев}. \quad (11)$$

Преимущества метода: 1) очень высокая безопасность обеспечивается за счет работы при температурах, близких к рабочей среде, что снижает риск быстрого взрыва или утечки; 2) высокая объемная плотность, при которой большой объем водорода может храниться в меньшем, компактном пространстве; 3) высокая чистота выделяемого водорода, не требующая повторной очистки; 4) долговременная стабильность.

Недостатками и проблемами метода являются: 1) большой вес, обусловлен использованием тяжелых сплавов; 2) необходима тепловая энергия для выделения водорода, а также управление температурой для его повторного поглощения; 3) низкая скорость абсорбции и высвобождения; 4) высокая стоимость из-за использования специальных металлов и сплавов, которые увеличивают первоначальную стоимость изготовления резервуара [12, 45].

**Твёрдофазное химическое хранение**

Твердотельное хранение водорода – это метод, при котором водород хранится и высвобождается обратимым образом либо физически (поглощение поверхностью), либо химически (реакция с твердыми частицами) в структуре химического вещества. Это хранение осуществляется 4 способами:

1) металлогидридным способ хранения, рассмотренным в предыдущем разделе, при котором водород химически связывается с определенными металлами или сплавами и проникает в их кристаллическую решетку;

2) с использованием углеродные нанотрубки, графен и углеродные наноструктуры, которые физически поглощают водород на своей поверхности;

3) применением металлоорганические каркасы (МОК), которые имеют очень сложную пористую решетку и высокий уровень удержания молекул водорода;

4) применяем композитов и Максенов (MXenes), которые представляют собой новые двумерные материалы для улучшения способности и скорости поглощения водорода [47].

## Преобразование водорода в электричество и тепло с помощью ТЭ

Топливный элемент – это электрохимическое устройство, которое преобразует водород в электричество и тепло. Одним из наиболее важных применений топливных элементов является их использование для выработки электроэнергии и тепла в масштабах электростанций. Небольшие топливные элементы также используются в зданиях. Таким образом, электростанции на топливных элементах делятся на две основные категории: централизованные энергоустановки и распределенные энергоустановки [12, 48].

1. Централизованные энергоустановки – это электростанция, электроэнергия и тепло которой, вырабатываемые по линиям электропередачи и изолированным трубопроводам, передаются в центры потребления, с выходной мощностью от 5 до 500 МВт.

2. Распределенные энергоустановки – это электростанция, на которой тепловая энергия для производства электроэнергии находится в месте потребления или вблизи него, и небольшие объекты, потребляющие электроэнергию и тепло, такие как жилые дома и коммерческие центры, могут использовать эту электростанцию, а выходная мощность этой электростанции составляет от 200 кВт до 20 МВт.

Главными особенностями электростанций на топливных элементах являются их очень высокий КПД (от 80 до 90%) благодаря прямому преобразованию химической энергии в электричество и использованию выделяемого тепла. Эти электростанции также практически не загрязняют окружающую среду. Их электрический КПД также составляет от 40 до 60 процентов (рис. 11).

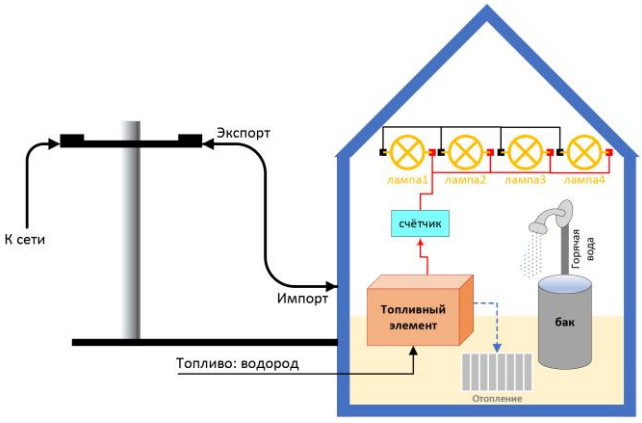



**Рис. 11. Микро-теплоэлектроцентраль установка ($\mu$ТЭЦ) на топливных элементах**

В табл. 3 представлены типы топливных элементов в зависимости от типа применения, рабочей температуры и технических характеристик каждого из них [12, 48, 49].

Таблица 3

**Особенности топливных элементов (ТЭ) централизованных и распределенных электростанций**

| Тип ТЭ | Тип применения | Рабочая температура, °С | Мощность, кВт | | КПД, % | Технические характеристики |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | Электрическая | Тепловая | | |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
| ПЭМТЭ | Жилые дома, транспорт, портативное электронное оборудование | 30-100 | 1-250 | 4-39 | 40-60 | Предел рабочей температуры мембраны, электрокаталитическая токсичность, выход около 55%, электролиз и дорогостоящая мембрана, простота управления электролитом. |

Окончание табл. 3

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Щелочной ТЭ | В зданиях, больницах и малых предприятиях | 50-250 | 1 -2 800 | 500 - - 1 500 | 45-60 | Аварийное и автономное электроснабжение, горячая вода и отопление |
| Фосфорно-кислые ТЭ | Электростанции | 160-210 | 50 - - 400 000 | Высокий | 40-50 | Одновременное производство электроэнергии и тепла, жидкий электролит, температура окружающей среды должна быть выше 42°С. |
| Твердо-оксидные ТЭ | Электростанции | 500-1000 | 50 - - 400 000 | 5 | 50-65 | Электролит керамический и твердый, время запуска 8 часов, эффективность 50-60%, нечувствительность к примесям в топливе, разнообразие расходуемого топлива, высокая эффективность преобразования. |
| ТЭ на основе карбонатов | Распределенная выработка электроэнергии, комбини-рованная система отопления и электро-снабжения | 600-800 | 300 – - 400 000 | Высокий | 50-60 | Нечувствительность к примесям в топливе, создавая коррозионную среду, разнообразие топлива, высокая эффективность преобразования |

Согласно табл. 3, высокотемпературные топливные элементы подходят для применения на электростанциях, а низкотемпературные топливные элементы подходят для транспортных средств и жилых помещений. Преимущества и недостатки используемых топливных элементов приведены в табл. 4.

Таблица 4

**Преимущества и недостатки топливных элементов**

| Тип ТЭ | Преимущества | Недостатки |
|---|---|---|
| 1 | 2 | 3 |
| Полимерные электролити-ческие мембранные топливные элементы (ПЭМТЭ) | Использование мембран типа Нафион (Nafion) снижает вероятность разрушения электролита и образования трещин. Низкотемпературные условия эксплуатации делают этот топливный элемент пригодным для транспортных операций. | Чувствительность к CO и сере при отравлении катализатора, использование дорогостоящего платинового катализатора, управление водными ресурсами, дорогостоящая полимерная мембрана |
| Щелочные ТЭ | Дешевое производство, широкий выбор катализаторов (никель, серебро и оксид металла). | Высокая чувствительность к $CO_2$ в воздухе или топливе, использование водорода и чистого кислорода, необходимость обновления электролита. |

Окончание табл. 4

| 1 | 2 | 3 |
|---|---|---|
| Фосфорно-кислые ТЭ | Дешевый электролит, нечувствительность к $CO_2$, длительное время работы | Использование дорогостоящего платинового катализатора, чувствительность к отравлению CO и серой, агрессивным жидким электролитом. |
| Твердо–оксидные ТЭ (ТОТЭ) | Разнообразие видов топлива, высокая эффективность, прямое преобразование углеводородного топлива без использования топливного конвертера, дешевый катализатор, твердый электролит. | Дорогостоящие материалы для изготовления, ограничение применения при высоких температурах, проблема с покрытием. |
| ТЭ с расплав-ленным карбонатом | Из-за отсутствия редких металлов в электроде дешевые катализаторы менее подвержены отравлению, чем щелочные топливные элементы и топливные элементы с фосфорной кислотой, которые производят пар и передают его в турбину для выработки электроэнергии. | Сложность работы с электролитами, коррозия, остаточные химические реакции, относительно дорогие материалы. |

## Электростанция на топливных элементах в России

Основное внимание в данном исследовании уделяется электростанциям на протонных мембранных топливных элементах (ПЭМТЭ) в России. В России нет централизованных и крупномасштабных коммерческих распределенных электростанций, использующих технологию ПЭМТЭ. Разрабатываемые в стране проекты – это в основном высокопроизводительные производственные мощности, системы резервного электроснабжения, лабораторные электростанции, а также морские и полярные проекты малой и средней мощности (от нескольких киловатт до нескольких сотен киловатт). Развитие этой технологии в России направлено на локализацию ключевых компонентов (таких как полимерные мембраны и катализаторы) и обеспечение электроэнергией удаленных районов, а не на строительство централизованных электростанций.

Исследовательские и промышленные учреждения, такие как *Курчатовский институт*, *Крыловский государственный научный центр* и *Росатом*, являются одними из основных разработчиков этих систем. Их общими характеристиками являются:

• Мощность производства электроэнергии. Мощность модульных установок колеблется от нескольких сотен ватт до нескольких десятков киловатт для телекоммуникаций и резервного копирования и до нескольких сотен киловатт для морских лабораторий и проектов газовой инфраструктуры.

• Рабочая температура. Эти системы работают при низких температурах от 50°C до 90°C, а в некоторых образцах с модифицированными мембранами – примерно до 100°C, что позволяет быстро вводить их в эксплуатацию в холодных условиях.

• Электрическая эффективность. Сообщается, что эффективность прямого преобразования химической энергии в электричество в российских батареях на топливных элементах составляет около 50-60%.

• Тип топлива и чистота. Для этих агрегатов требуется водород очень высокой чистоты (более 99,99%), чтобы их платиновые катализаторы не подвергались воздействию монооксида углерода. В некоторых проектах, таких как планы Крыловского центра, для производства необходимого водорода на месте используются конвертеры природного газа (риформеры).

• Мембрана и электрод. В отечественных разработках используются полимерные мембраны и протонные проводники, аналогичные мембране Нафион (Nafion) или модифицированные образцы, а также каталитические слои на основе углерода и платины.

## Российские проекты разработки и использования топливных элементов

Из-за специфических климатических условий России и необходимости энергоснабжения районов, не имеющих доступа к глобальной распределительной сети, протонные мембранные топливные элементы используются в области морских объектов, электроснабжения полярных и отдаленных районов, а также производства водорода на электростанциях, и промышленность сосредоточена на использовании твердооксидных топливных элементов (табл. 5).

Таблица 5

**Российские проекты топливных элементов**

| Направление | Разработчик / Местоположение | Описание |
|---|---|---|
| Морские установки и суда | ФГБУ «НИЦ имени А.Н. Крылова» | Разработка и тестирование систем топливных элементов с ПЭМ для обеспечения вспомогательной электроэнергией судов, ледоколов и берегового газодобывающего оборудования. |
| Электроснабжение полярных и удаленных районов | НИЦ «Курчатовский институт» | Развитие модулей ПЭМТЭ для использования в холодном климате и в сочетании с возобновляемыми источниками энергии в удаленных районах. |
| Производство водорода на электростанциях | Кольская АЭС | Установка электролиза Поликом на Кольской АЭС для производства водорода чистотой 99.99%. |
| Промышленное использование твердооксидных топливных элементов | АО «ОДК» (входит в ГК «Ростех») | Для крупномасштабных стационарных электростанций (от нескольких сотен кВт до мВт), работающих непосредственно на природном газе, основное внимание уделяется твердооксидным ТЭ, а не ПЭМ. |
| Водородные технологии | АНО УК «Восточный водородный кластер» | Развития водородных технологий в области распределенных автономных энергетических систем и водородного транспорта, включая железнодорожный, автомобильный грузовой и морской. |

Например, один из проектов по созданию твердотельных топливных элементов является частью пилотного проекта АО «СКТБЭ» совместно со своими партнерами, которые разработали и изготовили сетевое накопительное устройство для энергии (СНЭ) на базе водородных топливных элементов (ВТЭ) и аккумуляторных батарей (АКБ) суммарной электрической мощностью 100 кВт и суммарной энергетической емкостью 500 кВт·ч (рис. 12 и 13) [50].

Как показано на рис. 13, внутри контейнера разделен на два отсека. В первом отсеке находится: электрохимический генератор на основе низкотемпературных топливных элементов (10 кВт); твердополимерный генератор водорода (производительностью до 4 м$^3$/ч) с системой очистки и осушки воды; бустерный компрессор; рекомбинаторы водорода – печи дожигания; приборы аварийного газового контроля.

Во втором отсеке: батарея на базе литий-ионных аккумуляторов (90 кВт); инверторная подсистема преобразователей; зарядное устройство; система автоматического

управления, включающая дистанционное управление и мониторинг накопителя с программным обеспечением станции и удаленного диспетчера; коммутирующая и пускозащитная арматура.




**Рис. 12. Блок сетевого накопителя энергии (СНЭ) с низкотемпературными топливными элементами**

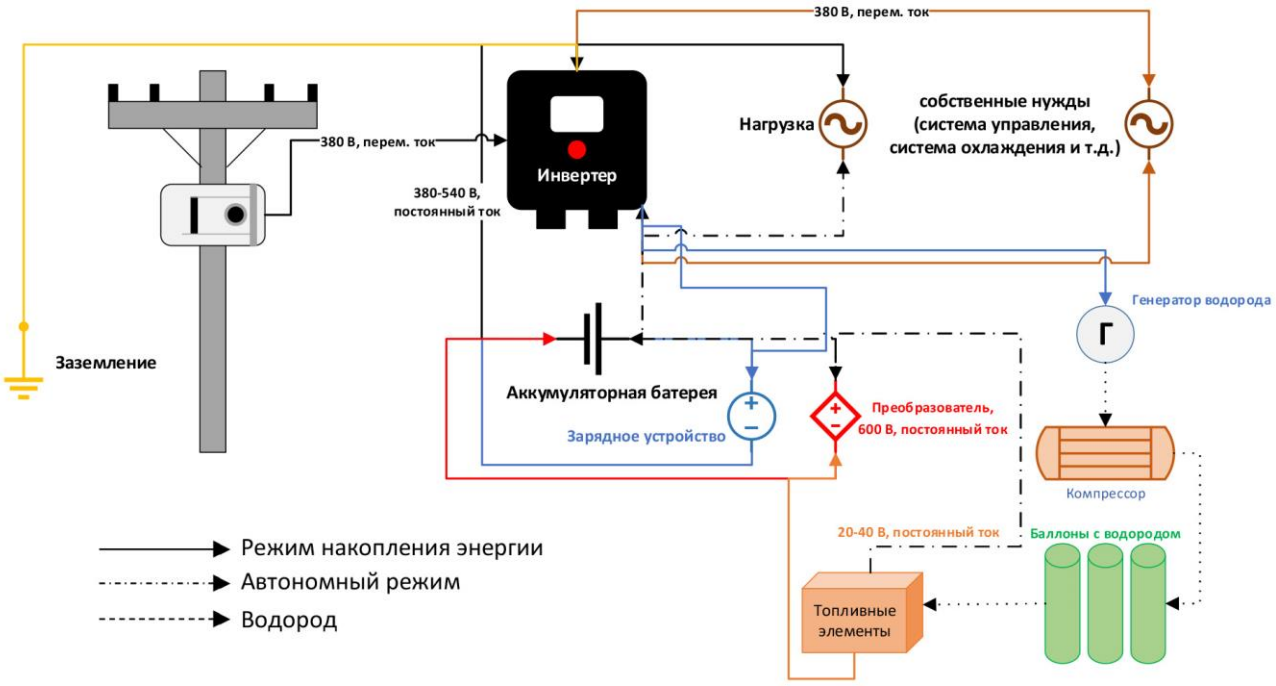



**Рис. 13. Блок СНЭ с низкотемпературными топливными элементами**

Снаружи контейнера установлена наполнительная с баллонами высокого давления до 400 атм суммарной емкостью по водороду 416 м$^3$.

Накопитель имеет три режима работы:

1) сетевой режим – питание потребителей осуществляется от внешней сети, через инверторную подсистему преобразователей, при этом АКБ заряжена, а водородные баллоны полностью заполнены;

2) автономный режим – напряжение внешней сети отсутствует, питание потребителей осуществляется через инверторную подсистему преобразователей от АКБ, при этом при снижении уровня заряда АКБ до 70% включается ВТЭ для её подзарядки;

3) режим накопления энергии – питание потребителей осуществляется от внешней сети, через инверторную подсистему преобразователей, при этом происходит зарядка АКБ, а также работает генератор водорода и компрессор для заполнения водородом баллонов высокого давления.

## Выводы

Согласно последним исследованиям, электролиз является старейшим методом получения водорода, а биогаз и биомасса являются одними из наиболее экономичных и возможных в будущем методов получения водорода. Производство водорода в России сегодня также более экономически выгодно, чем электролиз, благодаря огромным запасам углеводородов с использованием метода парового риформинга. Однако, если электроэнергия, необходимая для производства водорода, будет поступать из возобновляемых источников, метод электролиза может стать экономически эффективным способом производства водорода в России. На российских нефтеперерабатывающих заводах полученный водород потребляется в тех же производственных установках. На тепловых электростанциях полученный водород используется для охлаждения генератора. Процессы хранения делятся на две категории: химические и физические, где абсорбция относится к химической категории. При хранении водорода физически возможно хранить водород в сжиженной и газовой фазах. При хранении водорода в жидкой форме сохраняется больший объем водорода. При использовании метода хранения водорода в твердом виде возможно обратимое поглощение или высвобождение водорода в твердом виде, что является одним из наиболее экономичных методов хранения водорода. Другие методы, включая сжатие, сжижение и использование металлгидрида, в настоящее время недоступны из-за высокой стоимости и низкой эффективности. Топливные элементы – одна из перспективных технологий преобразования водорода в электричество и тепло. С точки зрения эффективности топливные элементы ПЭМ чаще всего используются для коммунальных нужд, а другие элементы из-за высоких температур используются на электростанциях.

## Информация о финансировании

Эта статья связана с диссертацией Захры Пезешки «Разработка метода повышения энергетической эффективности на основе энергетического моделирования зданий» на соискание учёной степени канд. техн. наук.

## Библиографический список

1. **Caliskan H., Dincer I., Hepbasli A.** Energy, exergy and sustainability analyses of hybrid renewable energy based hydrogen and electricity production and storage systems: Modeling and case study // Applied thermal engineering. – 2013. – Vol. 61(2). – P. 784-798. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2012.04.026.
2. **Demir M.E., Dincer I.** Development of a hybrid solar thermal system with TEG and PEM electrolyzer for hydrogen and power production // International Journal of Hydrogen Energy. – 2017. – Vol. 42(51). – P. 30044-30056. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2017.09.001.
3. **Özgür T., Yakaryilmaz A.C.** Thermodynamic analysis of a proton exchange membrane fuel cell // International Journal of Hydrogen Energy. – 2018. – Vol. 43(38). – P. 18007-18013. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2018.06.152.
4. A mobile renewable house using PV/wind/fuel cell hybrid power system / **M. Eroglu, E. Dursun, S. Sevencan** et al. // International journal of hydrogen energy. – 2011. – Vol. 36(13). – P. 7985-7992. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2011.01.046.
5. **Evans S., Nam H.W.** Six charts show how clean power was world's largest source of new energy in 2025 [Сайт]: CarbonBrief [30.06.26]. URL: https://www.carbonbrief.org/six-charts-show-how-clean-power-was-worlds-largest-source-of-new-energy-in-2025 (дата обращения: 01.11.2026).
6. Generation of electricity worldwide from 1990 to 2025, by energy source (in terawatt-hours) [Сайт]: Statista [Aug 3, 2026]. URL: https://www.statista.com/statistics/273273/world-electricity-generation-by-energy-source/ (дата обращения: 01.11.2026).
7. Recent advancement and strategy on bio-hydrogen production from photosynthetic microalgae / **M. Anwar, S. Lou, L. Chen** et al. // Bioresource technology. – 2019. – Vol. 292. – P. 121972. DOI: 10.1016/j.biortech.2019.121972.

**8. Levin D.B., Chahine R.** Challenges for renewable hydrogen production from biomass // International journal of hydrogen energy. – 2010. – Vol. 35(10). – P. 4962-4969. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2009.08.067.
**9. Ramachandran R., Menon R.K.** An overview of industrial uses of hydrogen // International journal of hydrogen energy. – 1998. – Vol. 23(7). – P. 593-598. DOI: 10.1016/S0360-3199(97)00112-2
**10.** Hydrogen Europe [Сайт]. URL: https://www.hydrogeneurope.eu.
**11. Pezeshki Z., Younas M., Rezakazemi M.** Market Prospects of Membrane Contactors // Membrane Contactor Technology: Water Treatment, Food Processing, Gas Separation, and Carbon Capture; Eds. M. Rezakazemi, M. Younas. – Weinheim: John Wiley and Sons, 2022. – P. 305-336. DOI: 10.1002/9783527831036.ch10.
**12. Maleki F., Akbari Z., Farzaneh A.** An overview on state-of-the-art methods for production and storage of hydrogen as a sustainable // Journal of Renewable and New Energy. – 2021. – Vol. 8(2). – P. 101-109. URL: https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.24234931.1400.8.2.11.7.
**13.** Polymers and Their Composites for Water-Splitting Applications / **Z. Pezeshki, Z. Heidari, M. Rezakazemi, M. Younas** // Polymers in Energy Conversion and Storage. – 2022. – Vol. 1. – P. 317. DOI: 10.1201/9781003169727-17.
**14. Baykara S.Z.** Hydrogen: A brief overview on its sources, production and environmental impact // International Journal of Hydrogen Energy. – 2018. – Vol. 43(23), – P. 10605-10614. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2018.02.022.
**15. Amin A.M., Croiset E., Epling W.** Review of methane catalytic cracking for hydrogen production // International Journal of Hydrogen Energy. – 2011. – Vol. 36(4). – P. 2904-2935. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2010.11.035.
**16. Danish M.** Hydrogen production by water electrolysis: a review of alkaline water electrolysis, PEM water electrolysis and high temperature water electrolysis // International Journal of Engineering and Advanced Technology (IJEAT). – 2015. – Vol. 4(3). – P. 80-93. URL: https://www.ijeat.org/portfolio-item/C3749024315/.
**17.** The intensification technologies to water electrolysis for hydrogen production–A review / **M. Wang, Z. Wang, X. Gong, Z. Guo** // Renewable and sustainable energy reviews. – 2014. – Vol. 29. – P. 573-588. DOI: 10.1016/j.rser.2013.08.090.
**18.** Performance analysis of the microgrid-scale hydrogen energy storage in Russia / **Z. Pezeshki, I. Sultanguzin, Y.V. Yavorovsky, A. Skorobatyuk** // Carbon Neutral Systems. – 2026. – Vol. 2(1). – P. 11. DOI: 10.1007/s44438-026-00032-4.
**19.** A comparison of electricity and hydrogen production systems with CO2 capture and storage. Part A: Review and selection of promising conversion and capture technologies / **K. Damen, M. van Troost, A. Faaij, W. Turkenburg** // Progress in energy and combustion science. – 2006. – Vol. 32(2). – P. 215-246. DOI: 10.1016/j.pecs.2005.11.005.
**20.** Solar pyrolysis of carbonaceous feedstocks: A review / **K. Zeng, D. Gauthier, J. Soria** et al. // Solar Energy. – 2017. – Vol. 156. – P. 73-92. DOI: 10.1016/j.solener.2017.05.033.
**21.** Enhancing safety in nuclear-powered water electrolysis for low-carbon hydrogen production: A process safety approach / K. Ireland, J. Cordiner, S.M. Hoseyni // Next Energy. – 2025. – Vol. 8. – P. 100372. DOI: 10.1016/j.nxener.2025.100372.
**22. Форсберг Ч.У.** Производство водорода с использованием ядерной энергии // Альтернативная энергетика и экология (S1). – 2003. – № S1. – С. 16. EDN: KVVPRF.
*Переводная версия:*
Forsberg C.W. Production of hydrogen using nuclear energy // International scientific journal for alternative energy and ecology. – 2003. – Is. S2. – P. 14. EDN: QIWAAD.
**23. Forsberg C.W.** Hydrogen, nuclear energy, and the advanced high-temperature reactor // International Journal of Hydrogen Energy. – 2003. – Vol. 28(10). – P. 1073-1081. DOI: 10.1016/S0360-3199(02)00232-X.
**24.** A review of recent researches on Bunsen reaction for hydrogen production via S–I water and H2S splitting cycles / **K. Zhang, W. Bao, L. Chang, H. Wang** // Journal of energy chemistry. – 2019. – Vol. 33. – P. 46-58. DOI: 10.1016/j.jechem.2018.08.015.

**25. Jamal Y., Wyszynski M.L.** On-board generation of hydrogen-rich gaseous fuels–a review // International journal of hydrogen energy. – 1994. – Vol. 19(7). – P. 557-572. DOI: 10.1016/0360-3199(94)90213-5.
**26. Abbas H.F., Daud W.W.** Hydrogen production by methane decomposition: A review // International journal of hydrogen energy. – 2010. – Vol. 35(3). – P. 1160-1190. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2009.11.036.
**27. Amin A.M., Croiset E., Epling W.** Review of methane catalytic cracking for hydrogen production // International Journal of Hydrogen Energy. – 2011. – Vol. 36(4). – P. 2904-2935. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2010.11.035.
**28. Ameyaw A.D., Ampomah W., Morgan A.** (2026). Integrated carbon capture and storage in hydrogen production: a combined techno-economic and life cycle assessment // Energy & Fuels. – 2026. – Vol. 40(3). – P. 1661-1676. DOI: 10.1021/acs.energyfuels.5c04158.
**29. Nardin V., Paladino E.E.** (2025). Hybrid multi-scale multiphase flow modeling of proton exchange membrane electrolyzers for green hydrogen production // International Journal of Hydrogen Energy. – 2025. – Vol. 183. – P. 151764. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2025.151764.
**30. Hamacher T.** Hydrogen as a Strategic Secondary Energy Carrier / Hydrogen and Fuel Cell: Technologies and Market Perspectives; Eds. J. Töpler, J. Lehmann. –Heidelberg: Springer, 2016. – P. 1-16. DOI: 10.1007/978-3-662-44972-1.
**31. Khosrouvani A., Zeynali R., GhasemZadeh K.** Hydrogen production using new solar membrane reactor technology // International Journal of Membrane Science and Technology. – 2017. – Vol. 4(2). – P. 50-68. DOI: 10.15379/ijmst.v4i2.831.
**32. Pezeshki Z., Rezakazemi M., Pezeshki A.** Microbes: applications for power generation // In Application of Microbes in Environmental and Microbial Biotechnology. – Singapore: Springer Nature Singapore, 2022. – P. 263-322. DOI: 10.1007/978-981-16-2225-0_9.
**33. Abuadala A., Dincer I., Naterer G.F.** Exergy analysis of hydrogen production from biomass gasification // International Journal of Hydrogen Energy. – 2010. – Vol. 35(10). – P. 4981-4990. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2009.08.025.
**34.** Hydrogen production / **G. Voitic, B. Pichler, A. Basile** et al. // In Fuel cells and hydrogen; Eds. V. Hacker, S. Mitsushima. – Amsterdam: Elsevier, 2018. – P. 215-241. DOI: 10.1016/B978-0-12-811459-9.00010-4.
**35. Liu K., Song C., Subramani V.** Hydrogen and syngas production and purification technologies // Hoboken: John Wiley & Sons, 2010. – 533 p. DOI: 10.1002/9780470561256.
**36.** An overview of hydrogen production methods: Focus on hydrocarbon feedstock / P. Afanasev, A. Askarova, T. Alekhina et al. // International Journal of Hydrogen Energy. – 2024. – Vol. 78. – P. 805-828. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2024.06.369.
**37. De Crisci A.G., Moniri A., Xu Y.** Hydrogen from hydrogen sulfide: towards a more sustainable hydrogen economy // International Journal of Hydrogen Energy. – 2019. – Vol. 44(3). – P. 1299-1327. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2018.10.035.
**38.** Hydrogen sulfide Decomposition: How to capture Hydrogen and Sulfur by photocatalysis / **M. Dan, S. Yu, Y. Li** et al. // Journal of Photochemistry and Photobiology C: Photochemistry Reviews. – 2019. – Vol. 42. – P. 100339. DOI: 10.1016/j.jphotochemrev.2019.100339.
**39.** Evaluation of the economic and technological aspects of producing blue hydrogen via ethanol-steam reforming with carbon capture / **P. Rosha, F.M. Ali, M. Yusuf, H. Ibrahim** // Sustainable Chemistry for Climate Action. – 2025. – Vol. 7. – P. 100155. DOI: 10.1016/j.scca.2025.100155.
40. Assessment of Russia's Green Hydrogen Demand Potential and Realization Pathways: A Scenario Analysis with Learning Curve Dynamics / **S. Ratner, K. Gomonov, S. Khachikyan, A. Shaposhnikov** // Hydrogen. – 2026. – Vol. 7(1). – P. 28. DOI: 10.3390/hydrogen7010028.
41. Levelized cost of CO2 mitigation from hydrogen production routes / **B. Parkinson, P. Balcombe, J.F. Speirs** // Energy & environmental science. – 2019. – Vol. 12(1). – P. 19-40. DOI: 10.1039/C8EE02079E.
**42.** Solar-powered regenerative PEM electrolyzer/fuel cell system / **Shapiro D., Duffy J., Kimble M., Pien M.** // Solar Energy. – 2005. – Vol. 79(5). – P. 544-550. DOI: 10.1016/j.solener.2004.10.013.

**43.** Production, storage, fuel stations of hydrogen and its utilization in automotive applications-a review / **T. Sinigaglia, F. Lewiski, M.E.S. Martins, J.C.M. Siluk** // International journal of hydrogen energy. – 2017. – Vol. 42(39). – P. 24597-24611. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2017.08.063.
**44. Niaz S., Manzoor T., Pandith A.H.** Hydrogen storage: Materials, methods and perspectives // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2015. – Vol. 50. – P. 457-469. DOI: 10.1016/j.rser.2015.05.011.
**45.** New technologies for storage and transfer of hydrogen fuel / **N. Rouyayi, R.S. Movakhar, F. Dabier, N.R. Nouri** // In Sixth National Conference on Nanotechnology in the Electricity Industry. – Tegeran: Niroo Research Institute, 2018. – P. 1-6 (No NANOENERTECH06_033). URL: https://civilica.com/doc/853681/.
**46.** Enhanced hydrogen storage/sensing of metal hydrides by nanomodification / **Luo Y., Wang Q., Li J., Xu** et al. // Materials Today Nano. – 2020. – Vol. 9. – P. 100071. DOI: 10.1016/j.mtnano.2019.100071.
**47. Moradi R., Groth K.M.** Hydrogen storage and delivery: Review of the state of the art technologies and risk and reliability analysis // International journal of hydrogen energy. – 2019. – Vol. 44(23). – P. 12254-12269. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2019.03.041.
**48. Chahartaghi M., Alizadeh-Kharkeshi B.** Performance analysis of a combined cooling, heating and power system driven by PEM fuel cell at different conditions. Modares Mechanical Engineering. – 2016. – Vol. 16(3). – P. 383-94. URL: https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.10275940.1395.16.3.18.5
**49. Синяк Ю.В.** Перспективы применения водорода в системах децентрализованного электро и теплоснабжения // Проблемы прогнозирования. – 2007. – № (3). – С. 42-59. EDN: HFLJYJ.
**50.** Сетевой накопитель электроэнергии на базе водородного топливного элемента и аккумуляторных батарей / **М.С. Бочарников, Ю.Б. Яненко, Д.С. Рутковский, А.А. Иванов** // Седьмая всерос. конф. с межд. участием «Топливные элементы и энергоустановки на их основе». – М.: ИФТТ РАН; МФТИ, 2020. – С. 6-8. URL: http://www.issp.ac.ru/ebooks/conf/FuelCell_2020.pdf.

## References

**1.** Caliskan, H., Dincer, I., & Hepbasli, A. (2013). Energy, exergy and sustainability analyses of hybrid renewable energy based hydrogen and electricity production and storage systems: Modeling and case study. *Applied thermal engineering*, *61(2)*, 784-798. https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2012.04.026
**2.** Demir, M.E., & Dincer, I. (2017). Development of a hybrid solar thermal system with TEG and PEM electrolyzer for hydrogen and power production. *International Journal of Hydrogen Energy*, *42(51)*, 30044-30056. https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2017.09.001
**3.** Özgür, T., & Yakaryilmaz, A.C. (2018). Thermodynamic analysis of a proton exchange membrane fuel cell. *International Journal of Hydrogen Energy*, *43(38)*, 18007-18013. https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2018.06.152
**4.** Eroglu, M., Dursun, E., Sevencan, S., Song, J., Yazici, S., & Kilic, O. (2011). A mobile renewable house using PV/wind/fuel cell hybrid power system. *International journal of hydrogen energy*, *36(13)*, 7985-7992. https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2011.01.046
**5.** Evans, S., & Nam, H. W. (2026, June 30). *Six charts show how clean power was world's largest source of new energy in 2025*. CarbonBrief. Retrieved November 1, 2026, from https://www.carbonbrief.org/six-charts-show-how-clean-power-was-worlds-largest-source-of-new-energy-in-2025
**6.** Statista Research Department (2026, Aug 3). *Generation of electricity worldwide from 1990 to 2025, by energy source (in terawatt-hours)*. Statista. Retrieved November 1, 2026, from https://www.statista.com/statistics/273273/world-electricity-generation-by-energy-source/
**7.** Anwar, M., Lou, S., Chen, L., Li, H., & Hu, Z. (2019). Recent advancement and strategy on biohydrogen production from photosynthetic microalgae. *Bioresource technology*, *292*, 121972. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.121972
**8.** Levin, D.B., & Chahine, R. (2010). Challenges for renewable hydrogen production from biomass. *International journal of hydrogen energy*, *35(10)*, 4962-4969. https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2009.08.067

**9.** Ramachandran, R. , Menon, R. K. (1998). An overview of industrial uses of hydrogen, *International Journal of Hydrogen Energy*, *23(7)*, 593-598. https://doi.org/10.1016/S0360-3199(97)00112-2
**10.** The European Hydrogen Association (n.d.). *Hydrogen applications*. Retrieved November 1, 2026, from https://www.hydrogeneurope.eu
**11.** Pezeshki, Z., Younas, M., & Rezakazemi, M. (2022). Market Prospects of Membrane Contactors. In *Membrane Contactor Technology: Water Treatment, Food Processing, Gas Separation, and Carbon Capture* (M. Rezakazemi & M. Younas Eds., pp. 305-336). John Wiley and Sons. https://doi.org/10.1002/9783527831036.ch10
**12.** Maleki, F., Akbari, Z., & Farzaneh, A. (2021). An overview on state-of-the-art methods for production and storage of hydrogen as a sustainable. *Journal of Renewable and New Energy*, *8(2)*, 101-109. https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.24234931.1400.8.2.11.7
**13.** Pezeshki, Z., Heidari, Z., Rezakazemi, M., & Younas, M. (2022). Polymers and Their Composites for Water-Splitting Applications. *Polymers in Energy Conversion and Storage*, *1*, 317. https://doi.org/10.1201/9781003169727-17
**14.** Baykara, S. Z. (2018). Hydrogen: A brief overview on its sources, production and environmental impact. *International Journal of Hydrogen Energy*, *43(23)*, 10605-10614. https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2018.02.022
**15.** Amin, A. M., Croiset, E., & Epling, W. (2011). Review of methane catalytic cracking for hydrogen production. *International Journal of Hydrogen Energy*, *36(4)*, 2904-2935. https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2010.11.035
**16.** Danish, M. (2015). Hydrogen production by water electrolysis: a review of alkaline water electrolysis, PEM water electrolysis and high temperature water electrolysis. *International Journal of Engineering and Advanced Technology (IJEAT)*, *4(3)*, 80-93. https://www.ijeat.org/portfolio-item/C3749024315/
**17.** Wang, M., Wang, Z., Gong, X., & Guo, Z. (2014). The intensification technologies to water electrolysis for hydrogen production–A review. *Renewable and sustainable energy reviews*, *29*, 573-588. https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.08.090
**18.** Pezeshki, Z., Sultanguzin, I., Yavorovsky, Y. V., & Skorobatyuk, A. (2026). Performance analysis of the microgrid-scale hydrogen energy storage in Russia. *Carbon Neutral Systems*, *2(1)*, 11. https://doi.org/10.1007/s44438-026-00032-4
**19.** Damen, K., van Troost, M., Faaij, A., & Turkenburg, W. (2006). A comparison of electricity and hydrogen production systems with CO2 capture and storage. Part A: Review and selection of promising conversion and capture technologies. *Progress in energy and combustion science*, *32(2)*, 215-246. https://doi.org/10.1016/j.pecs.2005.11.005
**20.** Zeng, K., Gauthier, D., Soria, J., Mazza, G., & Flamant, G. (2017). Solar pyrolysis of carbonaceous feedstocks: A review. *Solar Energy*, *156*, 73-92. https://doi.org/10.1016/j.solener.2017.05.033
**21.** Ireland, K., Cordiner, J., & Hoseyni, S. M. (2025). Enhancing safety in nuclear-powered water electrolysis for low-carbon hydrogen production: A process safety approach. *Next Energy*, *8*, 100372. https://doi.org/10.1016/j.nxener.2025.100372
**22.** Forsberg, C. W. (2003). Production of hydrogen using nuclear energy. *International scientific journal for alternative energy and ecology, S2*, 14.
**23.** Forsberg, C. W. (2003). Hydrogen, nuclear energy, and the advanced high-temperature reactor. *International Journal of Hydrogen Energy*, *28(10)*, 1073-1081. https://doi.org/10.1016/S0360-3199(02)00232-X
**24.** Zhang, K., Bao, W., Chang, L., & Wang, H. (2019). A review of recent researches on Bunsen reaction for hydrogen production via S–I water and H2S splitting cycles. *Journal of energy chemistry*, *33*, 46-58. https://doi.org/10.1016/j.jechem.2018.08.015
**25.** Jamal, Y., & Wyszynski, M. L. (1994). On-board generation of hydrogen-rich gaseous fuels–a review. *International journal of hydrogen energy*, *19(7)*, 557-572. https://doi.org/10.1016/0360-3199(94)90213-5
**26.** Abbas, H. F., & Daud, W. W. (2010). Hydrogen production by methane decomposition: A review. *International journal of hydrogen energy*, *35(3)*, 1160-1190. https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2009.11.036

**27.** Amin, A. M., Croiset, E., & Epling, W. (2011). Review of methane catalytic cracking for hydrogen production. *International Journal of Hydrogen Energy*, *36(4)*, 2904-2935. https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2010.11.035

**28.** Ameyaw, A. D., Ampomah, W., & Morgan, A. (2026). Integrated carbon capture and storage in hydrogen production: a combined techno-economic and life cycle assessment. *Energy & Fuels*, *40(3)*, 1661-1676. https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.5c04158

**29.** Nardin, V., & Paladino, E.E. (2025). Hybrid multi-scale multiphase flow modeling of proton exchange membrane electrolyzers for green hydrogen production. *International Journal of Hydrogen Energy*, *183*, 151764. https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2025.151764

**30.** Hamacher, T. (2016). Hydrogen as a Strategic Secondary Energy Carrier. In *Hydrogen and Fuel Cell: Technologies and Market Perspectives* (J. Töpler & J.Lehmann Eds., (pp. 1-16). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-662-44972-1

**31.** Khosrouvani, A., Zeynali, R., & GhasemZadeh, K. (2017). Hydrogen production using new solar membrane reactor technology. *International Journal of Membrane Science and Technology*, *4(2)*, 50-68. https://doi.org/10.15379/ijmst.v4i2.831

**32.** Pezeshki, Z., Rezakazemi, M., Pezeshki, A. (2022). Microbes: applications for power generation. In *Application of Microbes in Environmental and Microbial Biotechnology* (pp. 263-322). Springer Nature Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-16-2225-0_9

**33.** Abuadala, A., Dincer, I., & Naterer, G. F. (2010). Exergy analysis of hydrogen production from biomass gasification. *International Journal of Hydrogen Energy*, *35(10)*, 4981-4990. https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2009.08.025

**34.** Voitic, G., Pichler, B., Basile, A., Iulianelli, A., Malli, K., Bock, S., & Hacker, V. (2018). Hydrogen production. In *Fuel cells and hydrogen* (V. Hacker & S. Mitsushima Eds., pp. 215-241). Elsevier. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-811459-9.00010-4

**35.** Liu, K., Song, C., & Subramani, V. (2010). *Hydrogen and syngas production and purification technologies*. John Wiley & Sons. https://doi.org/10.1002/9780470561256

**36.** Afanasev, P., Askarova, A., Alekhina, T., Popov, E., Markovic, S., Mukhametdinova, A., Cheremisin, A., & Mukhina, E. (2024). An overview of hydrogen production methods: Focus on hydrocarbon feedstock. *International Journal of Hydrogen Energy*, *78*, 805-828. https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2024.06.369

**37.** De Crisci, A. G., Moniri, A., & Xu, Y. (2019). Hydrogen from hydrogen sulfide: towards a more sustainable hydrogen economy. *International Journal of Hydrogen Energy*, *44(3)*, 1299-1327. https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2018.10.035

**38.** Dan, M., Yu, S., Li, Y., Wei, S., Xiang, J., & Zhou, Y. (2019). Hydrogen sulfide Decomposition: How to capture Hydrogen and Sulfur by photocatalysis. *Journal of Photochemistry and Photobiology C: Photochemistry Reviews*, *42*, 100339. https://doi.org/10.1016/j.jphotochemrev.2019.100339

**39.** Rosha, P., Ali, F. M., Yusuf, M., & Ibrahim, H. (2025). Evaluation of the economic and technological aspects of producing blue hydrogen via ethanol-steam reforming with carbon capture. *Sustainable Chemistry for Climate Action*, *7*, 100155. https://doi.org/10.1016/j.scca.2025.100155

**40.** Ratner, S., Gomonov, K., Khachikyan, S., & Shaposhnikov, A. (2026). Assessment of Russia's Green Hydrogen Demand Potential and Realization Pathways: A Scenario Analysis with Learning Curve Dynamics. *Hydrogen*, *7(1)*, 28. https://doi.org/10.3390/hydrogen7010028

**41.** Parkinson, B., Balcombe, P., Speirs, J. F., Hawkes, A. D., & Hellgardt, K. (2019). Levelized cost of CO2 mitigation from hydrogen production routes. *Energy & environmental science*, *12(1)*, 19-40. https://doi.org/10.1039/C8EE02079E

**42.** Shapiro, D., Duffy, J., Kimble, M., & Pien, M. (2005). Solar-powered regenerative PEM electrolyzer/fuel cell system. *Solar Energy*, *79(5)*, 544-550. https://doi.org/10.1016/j.solener.2004.10.013

**43.** Sinigaglia, T., Lewiski, F., Martins, M.E.S., & Siluk, J.C.M. (2017). Production, storage, fuel stations of hydrogen and its utilization in automotive applications-a review. *International journal of hydrogen energy*, 42*(39)*, 24597-24611. https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2017.08.063

**44.** Niaz, S., Manzoor, T., & Pandith, A. H. (2015). Hydrogen storage: Materials, methods and perspectives. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *50*, 457-469. https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.05.011

**45.** Rouyayi, N., Movakhar, R.S., Dabier, F., & Nouri, N.R. (2018). New technologies for storage and transfer of hydrogen fuel. In *Sixth National Conference on Nanotechnology in the Electricity Industry* (pp. 1-6, NANOENERTECH06_033). Niroo Research Institute. https://civilica.com/doc/853681/ [In Persian]

**46.** Luo, Y., Wang, Q., Li, J., Xu, F., Sun, L., Zou, Y., Chu, H., Li, B., & Zhang, K. (2020). Enhanced hydrogen storage/sensing of metal hydrides by nanomodification. *Materials Today Nano*, *9*, 100071. https://doi.org/10.1016/j.mtnano.2019.100071

**47.** Moradi, R., & Groth, K. M. (2019). Hydrogen storage and delivery: Review of the state of the art technologies and risk and reliability analysis. *International journal of hydrogen energy*, *44(23)*, 12254-12269. https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.03.041

**48.** Chahartaghi, M., & Alizadeh-Kharkeshi, B. (2016). Performance analysis of a combined cooling, heating and power system driven by PEM fuel cell at different conditions. *Modares Mechanical Engineering*, *16(3)*, 383-94. https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.10275940.1395.16.3.18.5 [In Persian]

**49.** Sinyak, Y. (2007). Perspektivy` primeneniya vodoroda v sistemax decentralizovannogo e`lektro i teplosnabzheniya [Prospects for the use of hydrogen in decentralized electricity and heat supply systems]. *Problemy prognozirovaniya, (3)*, 42-59. https://ecfor.ru/publication/perspektivy-primeneniya-vodoroda-v-sistemah [in Russian]

**50.** Bocharnikov, M. S., Yanenko, Yr. B., Rutkovskyy, D. S., & Ivanov, A.A. (2020). Network storage of electric energy based on a hydrogen fuel cell and batteries. In *the 7th all-russian conference "Fuel cells and power plants based on them"* (pp. 6-8). ISPP RAS, MIPT http://www.issp.ac.ru/ebooks/conf/FuelCell_2020.pdf [In Russian]

## Сведения об авторах

**Пезешки Захра**, канд. техн. наук, кафедра Энергоэффективных инженерных систем (ЭИС), Институт энергоэффективности и водородных технологий (ИЭВТ), ФГБОУ ВО «НИУ МЭИ», Москва; Кафедра промышленной теплоэнергетики, Московский Политех, г. Москва. E-mail: tejaratemrooz@gmail.com, SPIN-код: 4033-5483, ORCID: 0000-0003-3366-3647.

**Султангузин Ильдар Айдарович**, д-р техн. наук, профессор, кафедра Энергоэффективных инженерных систем (ЭИС), Институт энергоэффективности и водородных технологий (ИЭВТ), ФГБОУ ВО «НИУ МЭИ», г. Москва. E-mail: SultanguzinIA@mpei.ru, SPIN-код: 8110-8682, ORCID: 0000-0001-6324-5214.

**Канунников Олег Викторович**, канд. техн. наук, генеральный директор ООО «Термомеханика», г. Красноярск. E-mail: ole1256@gmail.com, ORCID: 0000-0003-4188-1484.

## Authors about

**Zahra Pezeshki**, Cand. of Tech. Sc. (PhDS), Research Assistant, Department of Energy Efficient Engineering Systems (EEES) Institute of Energy Efficiency and Hydrogen Technologies (IEEHT), National Research University "Moscow Power Engineering Institute"; Department of Industrial Heat Power Engineering, Moscow Polytechnic University. Moscow. E-mail: tejaratemrooz@gmail.com, ORCID: 0000-0003-3366-3647.

**Ildar Sultanguzin**, Dr. of Tech. Sciences (DSc), professor, Department of Energy Efficient Engineering Systems (EEES), Institute of Energy Efficiency and Hydrogen Technologies (IEEHT), National Research University "Moscow Power Engineering Institute", Moscow. E-mail: SultanguzinIA@mpei.ru, ORCID: 0000-0001-6324-5214.

**Oleg Kanunnikov**, Cand. of Tech. Sc. (PhDS), CEO of Thermomechanics LLC, Krasnoyarsk, Russia, ole1256@gmail.com, ORCID: 0000-0003-4188-1484.

## Ссылки для цитирования

Пезешки З., Султангузин И.А., Канунников О.В. Обзор современных методов производства и хранения водорода и использования водорода в качестве устойчивого источника энергии // Энергетические системы. – 2026. – № 3. – С. 87-109.

Pezeshki, Z., Sultanguzin, I., & Kanunnikov, O. (2026). An overview of modern methods for hydrogen production and storage and hydrogen use as a sustainable energy source. *Energy Systems, 3*, 87-109. https://doi.org/10.34031/es.2026.3.09