



Немецкая установка по производству водорода Uniper

Источник: [uniper.energy](https://uniper.energy)

УДК 620.92

DOI 10.46920/2409-5516\_2024\_1192\_70

EDN: HSYNKS

# Водородная энергетика: «за» и «против»

## Hydrogen energy: pro and contra

Николай ОСТРОВСКИЙ

Эколог, к. т. н.,

E-mail: [ecol34@list.ru](mailto:ecol34@list.ru)

Nikolay OSTROVSKIY

Ecologist, PhD

E-mail: [ecol34@list.ru](mailto:ecol34@list.ru)

Катамаран Energy Observer на водороде

Источник: [@ROKAutomation](https://twitter.com/ROKAutomation) / [Twitter.com](https://twitter.com/ROKAutomation)



Аннотация. В статье проведено сопоставление различных способов и технических устройств, связанных с использованием водорода для получения тепловой и электрической энергии. Показана экономическая нецелесообразность применения водорода в качестве котельного топлива. Наиболее перспективными направлениями развития водородной энергетики являются применение водородных топливных элементов в электротранспорте дальнего следования и накопителях электрической энергии.

*Ключевые слова: водородная энергетика, конверсия метана, водородный топливный элемент, электротранспорт, накопитель энергии.*

Abstract. The article compares various methods and technical devices related to the use of hydrogen to produce thermal and electrical energy. The economic inexpediency of using hydrogen as a boiler fuel is shown. The most promising actress of hydrogen energy development are the use of hydrogen fuel cells in long-distance electric transport and electric energy storages.

*Keywords: hydrogen energy, methane conversion, hydrogen fuel cell, electric transport, energy storage.*



**Очевидными недостатками водорода как моторного топлива по сравнению с метаном являются более высокая стоимость и взрывоопасность**

Термин «водородная энергетика» многозначен, поэтому оценка «водородной энергетики» должна осуществляться индивидуально для различных технических решений и областей их применения.

Этот термин начал использоваться для химических источников тока, в которых происходит окисление водорода в электрохимической ячейке (процесс, обратный электролизу воды), а затем его распространили и на применение водорода в двигателях внутреннего сгорания (ДВС) и в теплоэнергетике, как альтернативу природному газу (метану).



Водородная АЗС в Японии

Источник: [sergioferraris.it](http://sergioferraris.it)

## Теплоэнергетика

Обсуждение мы начнём с теплоэнергетики, потому что именно на неё ориентирована стратегия «зелёного энергоперехода». В обзоре Международного энергетического агентства (МЭА) подчёркивается [1], что в секторе энергетики использование водорода и аммиака привлекает все больше внимание; объявленные проекты имеют потенциал до 3,5 ГВт мощности к 2030 г.

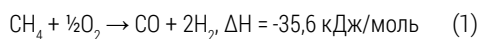
Нужно отметить, что конкретные примеры применения водорода в качестве котельного топлива автору данной статьи

неизвестны. Использованию водорода в этой сфере препятствуют как его более высокая стоимостью по сравнению с другими видами топлива, так и взрывоопасность. В статье [2] было исследовано горение смеси водород – кислород – водяной пар и показано, что работа парогенератора невозможна в случае достижения области детонации при объемной концентрации стехиометрической водород-кислородной смеси в смеси с водяным паром выше 30%. Если при работе пароперегревателя с объемной концентрацией горючей смеси в диапазоне 10–25% по каким-либо причинам произойдет срыв факела, то последующее поджигание рабочей смеси может вызвать его объемное распространение. И только при концентрации горючей смеси, не превышающей 6%, водяной пар выступает эффективным ингибитором горения.

### Получение водорода

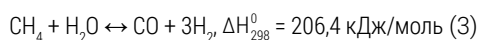
В настоящее время 95% производимого водорода используется в химической и нефтехимической промышленности для производства аммиака, метанола и гидрирования нефти (гидрокрекинг). При этом основным исходным сырьём является метан (85%) [3].

Для производства аммиака используют азото-водородную смесь, которую получают парциальным окислением метана:



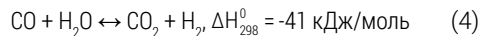
Для окисления используют воздух, подбирая соотношение воздух: метан таким образом, чтобы в результате получалась смесь водород: азот в соотношении 3:1. Углекислый газ удаляют из смеси абсорбцией в моноэтанолаmine.

Для других целей водород получают паровой конверсией метана [4]:



при температуре 700–800 °С. В результате образуется так называемый синтез-газ, который используются при производстве различной химической продукции.

Содержащаяся в смеси окись углерода так же может реагировать с водой с образованием водорода:



В нефтехимической промышленности водород образуется в процессе риформинга углеводородов, например:



Водород может быть выделен из смеси различными способами: криогенным, адсорбционным (степень чистоты водорода до 99,9999%), мембранным. Мембранный метод наиболее экономичен и прост в эксплуатации, степень чистоты получаемого водорода около 99,9% [5].

Паровая конверсия метана (3) проходит с поглощением тепла. Фактические затраты тепловой энергии значительно превосходят теоретические в связи с теплопотерями различной природы. Удельный расход топливного газа на конверсию 1 м<sup>3</sup> природного газа составляет от 0,4 до 0,9 м<sup>3</sup> в зависимости от условий осуществления процесса [4, 6].

Сэкономить природный газ можно используя для разогрева смеси тепло ядерного реактора. Но при этом возникают два вопроса. Во-первых, насколько это эффективно по сравнению с традиционным использованием ядерных реакторов для получения электрической энергии? Во-вторых, насколько обосновано совмещение на одном объекте двух процессов повышенной опасности: ядерного и химического? [7]. Нужно также отметить, что ни о какой экономии метана пока речь не идет. В представленной Опытным конструкторским бюро машиностроения им. Африкантова презентации атомной энерготехнологической установки для паровой конверсии метана указано, что из 350 тыс. т метана будет получаться 110 тыс. т водорода [7], что составляет 63% от теории.

В любом случае, на производство водорода затрачивается больше энергии, чем может быть получено при его сжигании. Поэтому и с энергетической, и с экономической позиций идея получения водорода из метана в качестве котельного топлива несостоятельна.

Те же доводы справедливы и для получения водорода электролизом воды. Коэффициент полезного действия (КПД) по затрачиваемой энергии обычного щелочного электролизёра не превышает 65%. Использование твёрдого полимерного электролита позволяет повысить

КПД до 85%, но пока такие электролизёры не получили широкого распространения [3]. Получение водорода электролизом становится экономически оправданным, когда мы имеем электрическую энергию, не имеющую сбыта. Такая ситуация возможна для изолированных энергетических систем, использующих ветряные и солнечные электростанции.

### Депонирование углекислого газа

Однако, существует и другое обоснование, состоящее в том, что образующийся в процессе паровой конверсии метана углекислый газ можно отделить от водорода и каким-то образом депонировать (поглотить), предотвратив его накопление в атмосфере.

Мы не будем в данной статье обсуждать насколько состоятельна гипотеза об антропогенном влиянии на глобальный климат, но коротко рассмотрим предлагаемые методы депонирования углекислого газа.

Согласно обзору [8], основными способами утилизации углекислого газа сегодня являются его подземное хранение в различных геологических структурах (истощенных месторождениях углеводородов, водоносных пластах, соляных формациях и др.) и закачка в продуктивные пласты на эксплуатируемых нефтяных и газовых месторождениях для повышения коэффициента извлечения нефти (газа). Опубликованы работы, в которых рассматриваются

---

**Получение водорода электролизом становится экономически оправданным, когда мы имеем электрическую энергию, не имеющую сбыта. Такая ситуация возможна для изолированных энергетических систем**

---

различные технологии замещения углекислым газом определенной части буферного метана, доля которого может достигать 50% объема подземных хранилищ газа (ПХГ). По мнению авторов, реализация такого способа утилизации углекислого газа имеет ряд несомненных преимуществ. Он не только позволяет использовать действующую инфраструктуру ПХГ для транспортировки и закачки углекислого газа, но и повышает её эффективность за счет увеличения активного объема метана, который может поставляться потребителю.

Из всего перечисленного только закачку углекислого газа в продуктивные пласты на эксплуатируемых нефтяных и газовых месторождениях для повышения коэффициента извлечения нефти (газа) можно рассматривать как утилизацию. Хранение углекислого газа в пластах рано

Установка по производству водорода

Источник: laptrinhx.com



## Анализ показывает, что наиболее перспективными направлениями развития водородной энергетики являются применение ВТЭ в электротранспорте дальнего следования и накопителях энергии

или поздно закончится его выходом на поверхность. Нецелесообразность смешения углекислого газа с метаном в ПХГ вообще выглядит очевидной.

Миллионы лет назад концентрация углекислого газа в атмосфере Земли, по некоторым оценкам, достигала 21% об. Его депонирование шло двумя основными путями:

1. В каменноугольный период (345–280 млн лет назад) в виде продуктов анаэробного гниения растений.
2. В меловой период (137–66 млн лет назад) в виде карбонатных скелетов простейших животных.

В настоящее время аналогичные процессы протекают с малой интенсивностью, поскольку концентрация углекислого газа в атмосфере очень низка – около 0,04% об. (2015 г.) [9]. Значительно ниже и температура у поверхности Земли в сравнении с указанными выше геологическими периодами.

### Водород в двигателях внутреннего сгорания

Очевидными недостатками водорода как моторного топлива по сравнению с метаном являются более высокая стоимость и взрывоопасность.

Другим направлением является использование водорода в качестве добавки к бензину. В этом случае водород производится в электролизёре, установленном в моторном отсеке автомобиля и запитанном от его электрической сети. По отзывам пользователей этот приём позволяет сократить расход топлива на 10–15% и уменьшает нагар в цилиндрах. Как недостаток отмечается сложность в эксплуатации. Информация о заводском выпуске автомобилей с электролизёрами отсутствует.

### Электромобили с водородными топливными элементами

Всё большее распространение получают электромобили, в которых электричество вырабатывается водородными топливными элементами (ВТЭ). По оценкам МЭА в 2021 г. уже насчитывалось около 50 тыс. подобных автомобилей [1]. На рис. 1 приведена конструкция такого автомобиля.

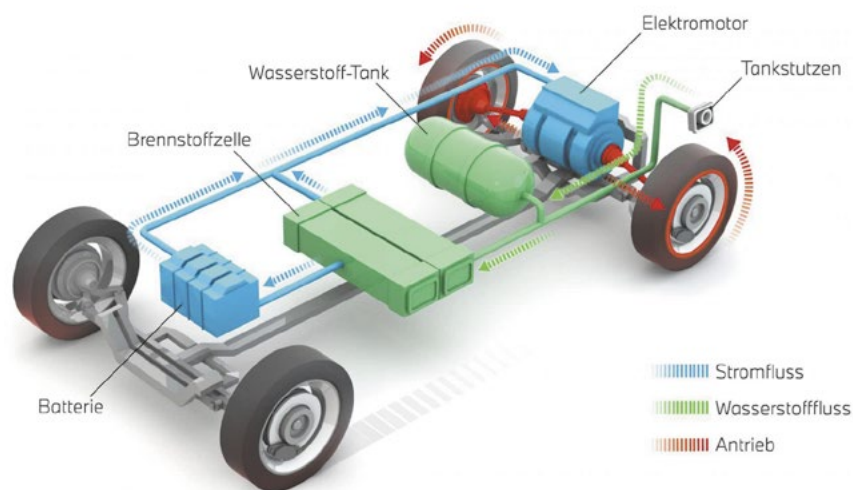
Как мы видим, питание электромотора осуществляется не от ВТЭ непосредственно, а от аккумулятора, поскольку ВТЭ не выдерживает резкие изменения нагрузки.

Насколько электромобиль с ВТЭ предпочтительней электромобиль с аккумулятором? И насколько электромобиль вообще предпочтительнее автомобиля с ДВС?

Если речь идёт о территории населённых пунктов, то основной аргумент в пользу эксплуатации электромобилей является отсутствие выбросов загрязняющих веществ. Именно автотранспорт является главным загрязнителем атмосферного воздуха в городах и нередко это загрязнение превышает допустимые пределы. Если же мы рассматриваем использование электротранспорта для поездок на дальние расстояния, то, разумеется, нужно исходить из экономических показателей.

Двигатель машины на водородных топливных элементах  
Источник: [drive2.ru](http://drive2.ru)





Brennstoffzelle – топливный элемент, Batterie – аккумулятор, Wasserstoff-Tank – водородный баллон, Elektromotor – электродвигатель, Tankstutzen – сопло бака, Stromfluss – электрический ток, Wasserstofffluss – поток водорода, Antrieb – привод

Рис. 1. Конструкция автомобиля с водородным топливным элементом

Источник: [10]

В общем, то, что дороже, то и оказывает большее негативное воздействие на окружающую среду.

В информационном пространстве можно встретить различные сравнения экономической эффективности эксплуатации автомобилей с ДВС, аккумуляторными батареями и ВТЭ. Но в большинстве случаев трудно понять, насколько сопоставимы эти автомобили по своим параметрам и эксплуатационным характеристикам, насколько типичны использованные цены на моторное топливо, электроэнергию и водород. В этом множестве выделяется работа группы авторов [11], посвящённая автобусам с различными силовыми установками, привязанным к московскому региону. Причём рассматриваются не только эксплуатационные затраты, но весь жизненный цикл автобуса, включающий его изготовление, эксплуатацию (12 лет, пробег 800 тыс. км) и утилизацию. В качестве силовых установок рассмотрены: дизельный двигатель, ДВС на сжатом природном газе, электродвигатель с литий-ионным аккумулятором (с литий-титановым анодом) ёмкостью 77 кВт·ч и 460 кВт·ч, электродвигатель с ВТЭ для водорода получаемого паровой конверсией метана, в т. ч. с поглощением углекислого газа, и электролизом. В расчётах были использованы следующие исходные данные:

- расход на 100 км:
  - дизельного топлива – 36,2 л,
  - природного газа – 48 м<sup>3</sup>,
  - электроэнергии – 180 кВт·ч,
  - водорода – 9 кг;
- цены энергоресурсов:
  - дизельного топлива – 47,1 руб./л,
  - сжатого природного газа – 19,5 руб./м<sup>3</sup>,
  - электроэнергии – 5,54 руб./кВт·ч,
  - водорода (паровая конверсия без улавливания CO<sub>2</sub>) – 150 руб./кг,
  - водорода (паровая конверсия с улавливанием CO<sub>2</sub>) – 225 руб./кг.

Итоговые результаты оценки жизненного цикла автобусов представлены на рис. 2.

Как мы видим, меньшая стоимость электродвигателя и привода у электробусов по сравнению с автобусами с ДВС компенсируются высокой стоимостью ВТЭ и аккумуляторных батарей. Самым экономичным оказывается автобус в ДВС, работающий на сжатом природном газе. Электробус с аккумуляторной батареей, рассчитанной на городской цикл, оказывается экономичней автобуса с дизельным двигателем. Электробус с аккумулятором высокой ёмкости, рассчитанным на междугородние поездки, уступает как дизельному автобусу, так и электробусу с ВТЭ.



Мы можем сделать общий вывод: конкурентоспособность электромобилей с ВТЭ по сравнению с аккумуляторными электромобилями возрастает с увеличением ёмкости используемых батарей. Но конкурентоспособность электромобилей с ВТЭ по сравнению с дизельными вызывает сомнения. То же суждение вероятно справедливо для сравнения кораблей с ВТЭ и дизельэлектроходов. В случае железнодорожного транспорта в сравнении должен присутствовать и вариант электрификации железной дороги.

### Использование водорода при накоплении электрической энергии

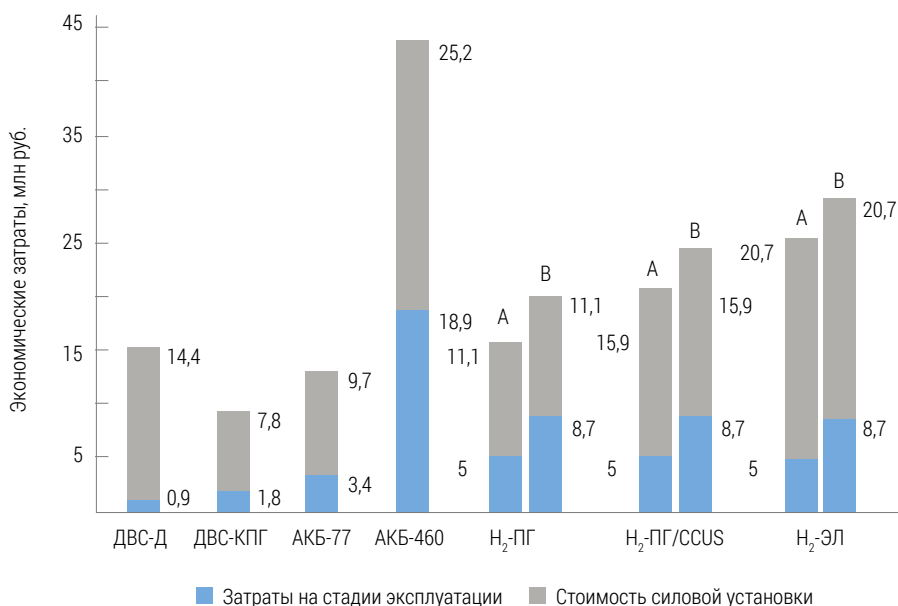
Обратимся теперь к накопителям электрической энергии (НЭЭ). Им посвящён большой обзор [12], в котором рассмотрено 19 типов и конструкций НЭЭ и 13 целей их применения. В таблице 1 сделана небольшая выборка из этого обзора.

Первое, что обращает на себя наше внимание – это широкий диапазон значений таких характеристик, как КПД, число циклов заряд-разряд и капитальные затраты на создание НЭЭ с ВТЭ. Это говорит о том, что их освоение находится в самом начале. Но по показателю «капитальные затраты на единицу энергии» накопители с ВТЭ уже сейчас превосходят аккумуляторные батареи. В заключении авторы статьи делают вывод, что наиболее целесообразно применять ВТЭ для интеграции в сети возобновляемых источников энергии.

В статье [13] проведено сравнение автономных источников электроснабжения на основе дизельной и бензиновой электростанций и с использованием гибридного энергетического комплекса (ГЭК), включающего электролизёр и ВТЭ. Сравнение проведено по показателю нормированной стоимости электрической энергии, в расчётах которого заложены как капитальные, так и эксплуатационные затраты. Стоимость ГЭК принята равной 50 тыс. USD для мощности 1 кВт, срок эксплуатации – 12 лет. В результате получены следующие значения нор-

Рис. 2. Экономические затраты в жизненном цикле для различных типов силовых установок

Источник: [11]



ДВС-Д – дизельный двигатель, ДВС-КПГ – на сжатом природном газе, АКБ-77 и АКБ-460 – электробусы с аккумуляторами ёмкостью 77 и 460 кВт·ч, H<sub>2</sub>-ПГ, H<sub>2</sub>-ПГ/CCUS и H<sub>2</sub>-ЭЛ – электробусы с ВТЭ при использовании водорода, полученного парой конверсией метана, в т. ч. с поглощением CO<sub>2</sub> (CCUS) и электролизом воды; варианты А и В отличаются различной стоимостью ВТЭ: А – 22500 руб./кВт, В – 60000 руб./кВт

Характеристика/Тип	Гидроаккумулирующий (PHS)	Свинцово-кислотная АБ (Lead-acid)	Литий-ионная АБ (Li-ion)	ВТЭ
Доступная мощность, МВт	100–5000	0–40	0–100	0–59
Степень изученности	Хорошо изучено	Хорошо изучено	Пилотные проекты	Исследуется
КПД, %	75–85	70–90	85–90	25–58
Время отклика	с – мин.	5–10 мс	20 мс – с	< 1 с
Срок службы, лет (число циклов)	40–60 (>13000)	3–15 (300–2000)	5–15 (1000–20000)	5–20 (1000–20000)
Капзатраты, USD/кВт	2000–4300	300–600	900–4000	500–10000
Капзатраты, USD/кВт·ч	5–100	300–400	600–3800	15
Время заряда	час. – мес.	мин. – сут.	мин. – сут.	час. – мес.
Время разряда	1–24 час.	с – час.	с – час.	с – 24 час.
Влияние на окружающую среду	Значительное	Среднее	Среднее	Безвредное

Таблица 1. Основные характеристики различных типов накопителей энергии

Источник: [12]

мированной стоимости электроэнергии, USD/кВт·ч: 0,27 – для дизельного двигателя, 0,39 – для бензинового двигателя, 1,17 – для ГЭК. К этому результату нужно сделать два замечания. Во-первых, электростанции с ДВС питаются за счёт запасённого топлива, ГЭК – за счёт текущего избытка электрической энергии, используемого для получения водорода. Во-вторых, в расчётах принята наивысшая стоимость оборудования для ГЭК.

## Заключение

Проведённый анализ показывает, что наиболее перспективными направлениями развития водородной энергетики являются применение ВТЭ в электротранспорте дальнего следования и накопителях электрической энергии. Её конкурентоспособность будет увеличиваться по мере повышения КПД электролизёров и ВТЭ и уменьшения их стоимости.

## Использованные источники

1. *Global Hydrogen Review 2022. International energy agency.* URL: <https://www.iea.org/reports/global-hydrogen-review-2022> (29.12.2022).
2. Прибатурин Н. А., Фёдоров В. А., Алексеев М. В., Богомолов А. Р., Сорокин А. Л., Азиханов С. С., Шевырев С. А. Экспериментальное исследование процесса горения смесей водород–кислород и метан–кислород в среде слабеперегретого водяного пара // *Теплоэнергетика.* 2016. № 5. С. 31–36.
3. Шафиев Д. Р., Трапезников А. Н., Хохонов А. А., Агарков Д. А., Бредихин С. И., Чичиринов А. А., Субчева Е. Н. Методы получения водорода в промышленном масштабе. Сравнительный анализ // *Успехи в химии и химической технологии.* 2020. Т. XXXIV. № 12. С. 53–57.
4. Афанасьев С. В., Рощенко О. С., Сергеев С. П. Технология получения синтез-газа паровой конверсией углеводородов // Интернет-сайт «Химическая техника». 17.07.2016. URL: <https://chemtech.ru/tehnologija-poluchenija-sintez-gazaparovoj-konversiej-uglevodorodov/> (27.03.2022).
5. Виноградов Н. Е., Талакин О. Г., Каграманов Г. Г. Мембранное выделение водорода из выбросных газов // *Химическая промышленность сегодня.* 2013. № 5. С. 29–39.
6. Коробцев С. В., Кротов М. Ф., Фатеев В. Н., Козлов С. И., Люгай С. В. Производство водорода из органического сырья // *Транспорт на альтернативном топливе.* 2013. № 6 (36). С. 10–16.
7. Два опасных производства в одном месте: химическое и ядерное: эксперты о водородной АЭС в Татарстане // *Бизнес-онлайн.* 01.02.2023. URL: <https://www.business-gazeta.ru/article/582046/>
8. Якубсон К. И. Перспективы производства и использования водорода как одно из направлений развития низкоуглеродной экономики в Российской Федерации (обзор) // *Журнал прикладной химии.* 2020. Т. 93. № 12. С. 1675–1695.
9. *The Global Climate in 2011–2015.* Geneva: World Meteorological Organization, 2016. WMO-No. 1179, p. 8. – URL: <https://public.wmo.int/en/resources/library/global-climate-2011%E2%80%932015> (07.03.2023).
10. Irina Klein. Водородные электромобили // *Хабр.* 03.05.2022. URL: <https://habr.com/ru/company/ua-hosting/blog/663996/>
11. Козлов А. В., Порсин А. В., Добровольский Ю. А., Кашин А. М., Теренченко А. С., Горин М. А., Тихонов А. Н., Милов К. В. Оценка жизненного цикла силовых установок на аккумуляторной батарее, водородных топливных элементах, двигателе внутреннего сгорания для городских автобусов в условиях московского региона // *Журнал прикладной химии.* 2021. Т. 94. № 6. С. 784–805.
12. Васильков О. С. Предпосылки применения систем накопления электроэнергии // *Наукоосфера.* 2022. № 10. С. 179–186. DOI: 10.5281/zenodo.7298452.
13. Бедретдинов Р. Ш. Экономическая оценка эффективности применения гибридного энергетического комплекса на основе водорода // *Интеллектуальная электротехника.* 2021. № 4. С. 47–58. DOI: 10.46960/2658-6754\_2021\_4\_47