



ВОДОРОДНАЯ ЭНЕРГЕТИКА: ОСВОЕННЫЕ И ПЕРСПЕКТИВНЫЕ СПОСОБЫ ХРАНЕНИЯ ВЕЩЕСТВА

А. М. Земляков, студент 3-го курса
E-mail: sanazemlakov@gmail.com
ФГБОУ ВО «Калининградский государственный
технический университет»

Водород, несмотря на свое повсеместное распространение, не сразу приходит на ум, когда речь заходит о декарбонизации мировой энергетики. В настоящее время водород не является системообразующим энергоносителем, что подразумевает незначительную заинтересованность в данном виде топлива людей, задающих вектор развития российской энергетики. В статье будут описаны способы хранения данного энергоресурса, а также предприняты попытки выяснить, какой из них является наиболее перспективным технологическим решением, определяющим дальнейшее развитие выбранного сегмента электроэнергетики.

Ключевые слова: водородная энергетика, жидкий водород, интерметаллические соединения, жидкофазные носители, аммиак, муравьиная кислота, микросферы.

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность выбранной темы связана с растущей значимостью водорода в мировой энергетике. Экологический фактор, занимающий в информационном поле все большее пространство, подкрепляет позиции водорода не только как источника, но и в роли накопителя избыточной электроэнергии, получаемой от солнечных и ветряных электростанций. Описанные способы применения водорода могут стать серьезным подспорьем для регионов, испытывающих трудности с бесперебойным электроснабжением. Помимо этого, возможность снижения углеродного следа во многих смежных областях (транспорт, металлургия) – серьезная причина для осуществления дальнейших технологических открытий. Хранение водорода – наукоемкая задача, требующая серьезных капиталовложений и исследований. В настоящее время человеку известно несколько довольно эффективных методов хранения водорода, каждый из которых имеет свои явные преимущества, но также не обделен и весомыми недостатками, что и будет описано в данной статье.

ОБЪЕКТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Объект исследования: способы хранения водорода.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Методы исследования: теоретический анализ, сравнительно-правовой анализ, абстрагирование, анализ статистических данных.

ЦЕЛЬ ИССЛЕДОВАНИЯ

Цель данного исследования – выяснить наиболее перспективные способы хранения водорода.

Задачи исследования:

- описать особенности обозначенных методов хранения;
- сравнить способы хранения между собой;
- выяснить наиболее перспективный способ хранения.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Водород – самый легкий газ из всех известных на данный момент, при нормальных условиях для хранения 1 кг водорода понадобится резервуар объемом свыше 10 м^3 , что совершенно неприемлемо в условиях его промышленного использования. Для хранения небольшого числа сжатого до 70 МПа водорода используют стальные баллоны [1], однако существование водородной хрупкости вынуждает применять меры для предотвращения разрушения металла [2].

- использование защитных покрытий (ингибиторы коррозии, никелирование);
- контроль условий эксплуатации (снижение времени контакта с агрессивными средами);
- легирование (использование металлов, влияющих на устойчивость к водороду).

Помимо вышеперечисленных важными факторами являются утечка и воспламеняемость водорода, требующие серьезного технологического контроля для предотвращения аварийных ситуаций. Диапазон воспламеняемости водорода в воздухе составляет от 4 до 77 %, что затрудняет создание безопасной негорючей среды хранения. Помимо широкого диапазона воспламеняемости, энергия, требующаяся водороду для воспламенения, является одной из самых низких энергий воспламенения среди известных веществ (около 0,02 МДж). Данный факт усугубляет риск утечки частиц вещества сквозь дефекты емкостного оборудования. Совокупность перечисленных факторов вынуждает искать иные способы хранения водорода. Для снижения рисков возникновения аварийных ситуаций существует несколько способов хранения промышленного водорода (хранение сжатого водорода было описано выше: [3]).

- Хранение жидкого водорода.
- Хранение водорода в виде гидридов.
- Хранение водорода в носителях (органических и неорганических).
- Хранение водорода в микросферах.

Хранение водорода в жидком состоянии подразумевает низкие температуры (-253°C), что представляет собой серьезные технологические трудности, связанные с хранением и транспортировкой энергоносителя на дальние расстояния. В настоящий момент в США стоимость хранения 1 кг водорода в крупных резервуарах превышает 300 долл. США [4]. В малых эта сумма увеличивается в 2–3 раза, так как согласно эффекту масштаба увеличение объема происходит быстрее роста площади поверхности, что в абсолютных значениях и будет давать существенную разницу. Главным недостатком такого вида хранения является сам процесс ожижения водорода. Низшая теплота сгорания (НТС) вещества равна $33 \text{ кВт}\cdot\text{ч/кг}$, затраты на ожижение составляют $10\text{--}14 \text{ кВт}\cdot\text{ч/кг}$, следовательно, больше трети энергии, затраченной в ресурсе, тратится только на его сжижение [5].

Однако, несмотря на все недостатки, существует явное преимущество в хранении водорода таким образом, оно заключается в плотности получившегося вещества. Плотность жидкого водорода составляет $70,8 \text{ кг/м}^3$, что более чем в 785 раз превышает значение газообразного состояния при нормальном давлении. Помимо явных габаритных и энергетических (плотность энергии на единицу объема) преимуществ, существуют еще и логистические, обусловленные эффективностью перевозок больших масс энергоносителя, при этом отсутствует необходимость поддерживать большое ($500\text{--}700 \text{ бар}$) давление, что значительно снижает требования к прочности материалов. Важной чертой всех способов хранения является

чистота водорода при хранении. В жидком состоянии водород имеет крайне низкую температуру, ниже, чем температуры затвердевания всех потенциально возможных примесей, входящих в состав первоначальной смеси. Вследствие чего уже на этапе сжижения газа требуется осуществлять очистительные процедуры (адсорбция под давлением, мембранное разделение, дистилляция) [6].

Адсорбция осуществляется с помощью сосуда с веществом, главной функцией которого является адсорбирование нежелательных примесей. Мембранное разделение осуществляется при прохождении газа через различные (металлические или полволоконные) мембраны, эффективность которых определяется их селективностью. Несмотря на более низкие показатели чистоты концентрации водорода, данный способ очистки выгодно отличается от предыдущего своей экономичностью и высокой мобильностью [7]. Дистилляция происходит посредством специальной колонны (непрерывного или периодического действия), в которой происходит разделение примесей и водорода, в результате чего последний, более летучий, поднимается в верхнюю часть колонны ректификации, а труднолетучие компоненты оседают на дне.

Абсорбирование водорода является главным основанием для образования гидрида вещества. Данный вид хранения энергоносителя лишен многих недостатков, свойственных сжиженному газу (диапазон допустимых температур, энергозатраты и безопасность), однако использование гидридов повсеместно редко является рентабельным способом хранения и транспортировки водорода. Наиболее явным недостатком данного метода является содержание водорода в гидридах. Водородоаккумулирующие свойства фаз Лавеса позволяют добиться 2,5%-го содержания водорода в смеси, что создает существенные трудности при транспортировке больших объемов вещества. Более высокую массовую плотность (свыше 7,5 %) имеет гидрид магния, однако процессы образования и десорбции происходят лишь при достаточно высоких температурах [8].

Еще одним важным фактором, влияющим на распространение данного метода содержания водорода, является высокая стоимость интерметаллических соединений. Помимо этого, сами свойства соединений могут со временем ухудшаться, теряя емкость из-за циклических процессов в ходе эксплуатации. Неоспоримым преимуществом хранения водорода в таком виде является более высокая плотность вещества. Объемная плотность водорода в большинстве соединений сопоставима с плотностью элемента в воде и составляет порядка 100 кг/м^3 , однако гидриды титана и ванадия могут превышать эти значения в 1,5–1,8 раза, что, в свою очередь, дает двукратный прирост объемной плотности в сравнении с хранением водорода в жидком состоянии. Компактность является главным преимуществом описанного метода. Кроме того, выгодно отличающейся способностью такого метода считаются условия получения и хранения гидридов интерметаллических соединений. Явным преимуществом в процессе получения гидриды обладают перед жидким водородом, для получения которого требуются крайне низкие температуры (20 К). Гидриды же в зависимости от атомов металлов образуются при температурах от 290 до 475 К, что позволяет их содержать в условиях, мало отличных от условий окружающей среды, при этом ограничивая влажность для снижения рисков образования оксидных пленок, ухудшающих поглощающие способности и со временем уменьшающих емкость интерметаллических соединений. Также данный способ хранения водорода имеет явное преимущество перед баллонами высокого давления, которые помимо энергетических затрат на сжатие имеют явные проблемы с безопасностью (взрывоопасность, воспламенение и водородное охрупчивание материала). Гидриды интерметаллов лишены таких недостатков за счет умеренных давлений (до 40 бар), при которых происходит процесс образования и распада соединений [5]. Немаловажное отличие хранения водорода в виде гидридов заключается в кристаллической решетке металла, которая, взаимодействуя с

водородом, «очищает» его от других газов, оставляя их в форме примесей. Затем в результате десорбции получается газ, чистота которого сравнима с водородом после процедуры адсорбции под давлением (99,999 %).

Метод хранения водорода в жидкофазных носителях основан на вступлении одного в обратимую химическую реакцию с органическим соединением. Продуктом реакции становится жидкость, которую так же, как и в случае с гидридами интерметаллических соединений, можно хранить в условиях, близких к естественным. Главной особенностью данного способа является доступность соединения для транспортировки. В случае с жидким водородом она затруднена вследствие высоких требований, предъявляемых к внешним условиям, а доставка гидридов в небольших объемах экономически нецелесообразна из-за огромной доли металла в соединении. Жидкофазные органические носители водорода лишены данного недостатка. Их физические свойства (летучесть, температуры кипения и замерзания и вязкость) сопоставимы со свойствами нефтепродуктов, что делает возможным транспортировку носителей посредством существующей инфраструктуры (танкеры, автомобильные и железнодорожные цистерны, трубопроводы). Гравиметрическая плотность сопоставима с массовой плотностью водорода в гидриде магния (более 7 %), объемная плотность не превышает 60 кг/м^3 [10]. Описанные характеристики делают данный вид хранения целесообразным. Однако данный метод не является полноценно экологичным в виду возможного образования метана при нахождении смеси в станциях дегидрирования. Помимо рисков возникновения углеродного следа существует проблема, напрямую влияющая на процесс гидрирования и дегидрирования носителя. Она связана с высокими температурами протекания обозначенных процессов, и если во время поглощения водорода реакция носит экзотермический характер, что делает возможным дальнейшее использование выделенного тепла, то в результате обратной реакции, протекающей при еще больших температурах (250–320 °C), компенсировать затраченную энергию не представляется возможным [10].

Стоит учесть тот факт, что даже описанные температуры достигаются лишь посредством катализаторов, которые при взаимодействии с веществом способствуют снижению энергетического барьера и увеличению скорости протекания реакции. Естественно, использование катализаторов приводит к удорожанию самого процесса, в их роли выступают металлы платиновой группы. Также серьезным недостатком данного метода является чистота дегидрированного водорода. Высокочистый газ (99,999 %) можно получить лишь при минимальном содержании CO, что достигается лишь предварительной осушкой и очисткой. Наибольшая часть образующихся при дегидрировании примесей вызвана именно присутствием воды, входящей в состав жидкофазных носителей.

Вариация, обозначенная выше, не является единственной. Альтернативой органическим носителям водорода выступает аммиак, обладающий более высокими показателями объемной (до 120 кг/м^3) и гравиметрической (более 17,5 %) плотности. Технологическое развитие промышленного производства аммиака продолжается уже на протяжении более полувека, что подразумевает развитую инфраструктуру и существенный эксплуатационный опыт. Однако этот способ не решает проблемы дороговизны и энергетических затрат, вследствие необходимости сжижения аммиака, а также больших температур десорбции (до 900 °C) при использовании никелевого катализатора. Перспективы метанола, выступающего альтернативой аммиаку, тоже весьма туманны. Несмотря на внушительные показатели объемной (до 100 кг/м^3) и гравиметрической (свыше 12 %) плотности, промышленное производство метилового спирта на экологических началах находится только на раннем этапе, вследствие чего данный вид хранения водорода в ближайшем будущем не стоит рассматривать как наиболее обоснованный. Чистота получаемого в процессе дегидрации водорода сильно уступает вышеописанным способам и при условии использования мембранных установок

не превышает 98 % [11]. Основной примесью смеси, выходящей из реактора, является сам аммиак. Использование дополнительных систем очистки для достижения высокой чистоты (99,999 %) ведет к удорожанию всего процесса.

Вероятно, наиболее наукоемкая и активно исследуемая технология для систем хранения водорода – муравьиная кислота. Объемная емкость водорода при выборе этого способа хранения составляет 53 кг/м³, что на 25 % больше, чем при хранении газообразного водорода при 700 бар, а внушительная массовая доля вещества (4,4 %) делает описываемую технологию весьма привлекательной для дальнейшего развития [12]. Использование катализаторов платиновой группы делает возможным получение высококачественного водорода (99,999 %). Важной особенностью муравьиной кислоты является ее агрегатное состояние. Она не требует сжижения, как аммиак, и остается в жидком состоянии при больших температурах, нежели метанол. Также преимуществом муравьиной кислоты является низкая токсичность, чем опять же не могут «похвастаться» аммиак и метиловый спирт. Важная роль муравьиной кислоты в снижении углеродного следа заключается в концепции ее замкнутого цикла, на первом этапе которого можно использовать СО₂, уловленный из атмосферы. Однако для протекания реакции полученного электролизом водорода и уловленного углекислого газа требуется катализатор. Тем не менее передовые исследования в области зеленой химии постепенно решают вопрос замены металлов платиновой группы (МПП) более дешевыми аналогами на основе кобальта. Главным недостатком выбранного способа является его цена, складывающаяся из дорогостоящих технологий прямого улавливания водорода из атмосферы, коррозионные свойства кислоты требуют использования коррозионно-стойких материалов, а также необходимость применения катализаторов, чувствительных к угарному газу, выделяющемуся при дегидрации.

Техническим новшеством, стремительно выходящим за рамки технологических разработок, является хранение водорода в микросферах. Общий принцип данного метода заключается в заполнении микроскопических сфер газообразным водородом под большим давлением (свыше 1 000 бар), который активно проникает в структуру материала, наполняя полости сфер. Проникновение в структуру материала становится возможным при температурах 473–673 К, что требует дополнительных энергозатрат на нагрев [13]. Данная технология имеет внушительный теоретический потенциал, связанный с уменьшением плотности материала стенок. В настоящее время наибольшее распространение в качестве такого получило стекло. Максимально достигнутая гравиметрическая плотность водорода в таких сферах составляет 12 %, при ожидаемой объемной плотности в районе 50 кг/м³ [3]. Несмотря на способность выдерживать большие внутренние давления, сферы чувствительны к механическим воздействиям извне, по причине которых происходят потери водорода. Главным недостатком описываемого метода является температура, которую необходимо поддерживать для эффективного высвобождения водорода из сферы, значения могут достигать 600 °С [14]. Однако чистота водорода, получаемого на выходе, очень велика (99,999 %) за счёт размера других молекул, не способных в существенном количестве проникать сквозь поверхность стекла, а использование высококачественных материалов с минимальным числом примесей способно свести выделение парниковых газов при выпуске вещества на нет.

Перспективным направлением развития микросфер как носителей водорода является переход к полимерным и композитным материалам. В настоящий момент технологическая зрелость данных решений невелика, однако потенциальный переход на материалы такой структуры могут существенно повлиять на сегмент водородной энергетики. Основная цель композитной структуры заключается в создании универсальных материалов, сочетающих ключевые преимущества предшествующих разработок.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Все описываемые в данной статье виды хранения водорода занимают свою экономическую и эксплуатационную нишу, на запросы которой отвечают их свойства. В настоящий момент уникальных, общеэксплуатационных способов хранения водорода не существует. Сравнительные характеристики физических и экономических особенностей методов хранения водорода приведены ниже (таблицы 1, 2).

Таблица 1 – Физические особенности методов хранения водорода

Методы хранения водорода	Объемная плотность, кг/м ³	Гравиметрическая плотность, %	Давление, бар	Температура хранения, °С
В баллонах под давлением 700 бар	40	5,5	700	Комнатная
Жидкий водород	70,8	8–9	До 10	-253 °С
Гидриды интерметаллических соединений	До 190 (VN ₂) До 150 (TiH ₂)	Фазы Лавеса (до 2,5) MgH ₂ (7,5)	±1,1 До 30 (для гидрирования)	Комнатная
Жидкофазные носители	До 60	До 7,1	±1,1 До 10 (для гидрирования)	Комнатная
Аммиак	100–120	17,5	До 20 (20°С)	-33 °С или комнатная (под давлением)
Муравьиная кислота	53	4,4	±1,1 До 50 (для гидрогенизации)	Комнатная
Микросферы	До 50	До 12	±1,1 Свыше 1 000 (внутри)	Комнатная

Таблица 2 – Экономические особенности методов хранения водорода

Методы хранения водорода	Энергетические затраты (зарядка)	Энергетические затраты (разрядка)	Чистота выделяемого вещества	Катализаторы
В баллонах под давлением 700 бар	Сжатие (до 15% НТС)	0 % НТС	Очень высокая (≥99,99 %)	Не применяются
Жидкий водород	Сжижение (до 40 % НТС)	0 % НТС	Очень высокая (≥99,99 %)	Не применяются
Гидриды интерметаллических соединений	Нагрев (до 30 % НТС)	Нагрев (20 % НТС)	Очень высокая (≥99,99 %)	Ni, Zr, Pd
Жидкофазные носители	Нагрев (до 30 % НТС)	Нагрев (20–35 % НТС)	Низкая (97 % до очистки)	МПП
Аммиак	Сжатие и нагрев (25 % НТС)	Разложение (25 % НТС)	Очень низкая (≤80% до очистки)	Ni
Муравьиная кислота	Энергия активации (до 25 % НТС)	Разложение (до 25 % НТС)	Высокая (99,5 % до осушения)	МПП (в перспективе замена на пористые материалы)
Микросферы	Сжатие и нагрев (до 35 % НТС)	Нагрев (до 35 % НТС)	Очень высокая (≥99,99 %)	Не применяются

Самым доступным и распространенным методом является хранение газообразного водорода в баллонах под давлением 700 бар. Крупные логистические перевозки ресурса за счет большой объемной плотности осуществляются с применением криогенного метода. Оставшиеся способы, упомянутые в данной статье, относятся к разряду перспективных и на данный момент не имеют такого технологического развития, чтобы вытеснить основные методы. Гидриды интерметаллических соединений, несмотря на отсутствие серьезных требований к условиям окружающей среды, невозможно распространить повсеместно из-за небольшой массовой доли водорода в веществе и дороговизны металлов. Основная масса жидкофазных носителей до конца не экологичны, а необходимость нагрева на обеих стадиях процесса и использование дорогих катализаторов платиновой группы перекрывает преимущества развитой инфраструктуры. Аммиак также не может являться совершенным носителем из-за огромных температур десорбции, токсичности и необходимости использования большого числа очистительных сооружений. Концепция замкнутого цикла привлекает внимания исследователей к муравьиной кислоте, однако дороговизна технологий улавливания CO₂ и необходимость использовать дорогостоящие катализаторы тормозят распространение технологии. Микросферы на данный момент не являются коммерческой технологией, но широко рассматриваются в области научных исследований. Возможность существенного снижения температуры внедрения водорода в сферу за счет полимеров и потенциальная вероятность объединения прочностных и температурных свойств в композитах могут совершить технологическую революцию в сфере водородной энергетики, однако в настоящее время использование данного метода экономически нецелесообразно.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Тарасов, Б. П. Методы хранения водорода и возможности использования металлгидридов / Б. П. Тарасов, В. В. Бурнашева, М. В. Лотоцкий, В. А. Яртысь // АЭЭ. – 2005. – № 12. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/metody-hraneniya-vodoroda-i-vozmozhnosti-ispolzovaniya-metallogidridov> (дата обращения: 08.10.2025).
2. Водородное охрупчивание металлов и методы защиты: megatradegas.ru [официальный сайт]. – URL: <https://megatradegas.ru/> (дата обращения: 08.10.2025).
3. Фатеев, В. Н. Проблемы аккумулирования и хранения водорода / В. Н. Фатеев, О. К. Алексеева, С. В. Коробцев [и др.] // Kimya Problemleri. – 2018. – № 4. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/problemy-akkumulirovaniya-i-hraneniya-vodoroda> (дата обращения: 09.10.2025).
4. Hydrogen Storage: официальный сайт. – URL: <https://www.energy.gov/eere/fuelcells/hydrogen-storage> (дата обращения: 08.10.2025).
5. Алексеева, О. К. Системы хранения водорода / О. К. Алексеева, С. И. Козлов, Р. О. Самсонов, В. Н. Фатеев // Транспорт на альтернативном топливе. – 2009. – № 4 (10). – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/sistemy-hraneniya-vodoroda> (дата обращения: 08.10.2025).
6. Абдрашитов, Р. Х. Анализ различных методов очистки водорода / Р. Х. Абдрашитов // Теория и практика современной науки. – 2024. – № 6 (108). – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/analiz-razlichnyh-metodov-ochistki-vodoroda> (дата обращения: 08.10.2025).
7. Мембранное разделение водородосодержащих газовых смесей // promtegra.ru [официальный сайт]. – URL: <https://promtegra.ru/tehnologii/membrannoe-razdelenie-vodorodsoderzhashchikh-gazovykh-smesey/> (дата обращения: 08.10.2025).
8. Вербецкий В. Н. Гидриды интерметаллических соединений – синтез, свойства и применение для аккумулирования водорода / В. Н. Вербецкий, С. В. Митрохин // АЭЭ. –

2005. – № 10. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/gidridy-intermetallicheskih-soedineniy-sintez-svoystva-i-primenenie-dlya-akkumulirovaniya-vodoroda> (дата обращения: 08.10.2025).

9. Проблемы хранения водорода: за какими технологиями будущее // sectormedia.ru [официальный сайт]. – URL: <https://sectormedia.ru/news/energetika/problemy-khraneniya-vodoroda-za-kakimi-tehnologiyami-budushchee/> (дата обращения: 08.10.2025).

10. Бессарабов, Д. В. Новые технологии в водородной энергетике: проблемы и решения / Д. В. Бессарабов // postnauka.org [официальный сайт] [2024]. – URL: <https://postnauka.org/longreads/157530> (дата обращения: 08.10.2025).

11. Об эффективности мембранных технологий извлечения водорода из продувочных и танковых газов синтеза аммиака // chemtech.ru [официальный сайт] [2017]. – URL: <https://chemtech.ru/ob-jeffektivnosti-membranoj-tehnologii-izvlechenija-vodoroda-iz-produvochnyh-i-tankovyh-gazov-sinteza-ammiaka/> (дата обращения: 08.10.2025).

12. Макарян, И. А. Хранение водорода с использованием жидких органических носителей (обзор) / И. А. Макарян, И. В. Седов, А. Л. Максимов // Журнал прикладной химии. – 2020. – Т. 93, № 12. – С. 1716–1733.

13. Федотов, А. В. Способы хранения и аккумулирования водорода / А. В. Федотов, Д. А. Ковалев // Электротехнологии и электрооборудование в АПК. – 2021. – Т. 68, № 3 (44). – С. 78–85.

14. Котельникова, С. А. Водородная энергетика: хранение водорода / С. А. Котельникова // Энергетические установки и технологии. – 2022. – Т. 8, № 4. – С. 64–70.

HYDROGEN ENERGY: MASTERED AND PROMISING METHODS OF HYDROGEN STORAGE

A. M. Zemlyakov, 3rd year student
E-mail: sanazemlakov@gmail.com
Kaliningrad State Technical University

Hydrogen, despite its ubiquity, does not immediately come to mind when it comes to decarbonization of global energy. Currently, hydrogen energy is not a systemically important energy carrier, which implies little interest in this type of fuel from people who set the vector for the development of Russian energy. The article will describe the methods of storing this energy resource, as well as attempts to find out which of them is the most promising technological solution that determines the further development of the selected segment of the electric power industry.

Keywords: *hydrogen energy, liquid hydrogen, intermetallic compounds, liquid-phase carriers, ammonia, formic acid, microspheres.*