

УДК 66.076 + 656.61
EDN ZKNIAW

СРАВНЕНИЕ СПОСОБОВ ХРАНЕНИЯ И ТРАНСПОРТИРОВКИ ВОДОРОДА, ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРЕИМУЩЕСТВ И НЕДОСТАТКОВ, АНАЛИЗ ПЕРСПЕКТИВ

А.С. Реуцкий, канд. техн. наук, Российский морской регистр судоходства, 191186 Россия, Санкт-Петербург, Миллионная ул., 7А, e-mail: reuckii.as@rs-class.org

В работе рассматриваются основные технически реализуемые стационарные и мобильные способы хранения водорода. Задачей исследования является анализ применяемых и перспективных решений, определены основные критерии для их сравнения. Цель исследования — определить технологии хранения водорода, пригодные для использования на водном транспорте. Для этого были обобщены и проанализированы материалы исследований отечественных и зарубежных ученых, а также профильные руководящие документы. Использованный подход позволил выполнить анализ современных технологий хранения водорода, определить наиболее пригодные для реализации на морском транспорте и выполнить их сопоставление при помощи выявленных критериев.

Ключевые слова: водород, хранение водорода, транспортировка водорода, морская транспортировка водорода, сжиженный водород, LH_2 , сжатый газообразный водород, CGH_2 , аммиак, NH_3 , метанол, CH_3OH , жидкие органические носители водорода, состояния водорода, физические характеристики, химические характеристики.

Для цитирования: Реуцкий А.С. Сравнение способов хранения и транспортировки водорода, определение преимуществ и недостатков, анализ перспектив / А.С. Реуцкий // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. — 2026. — Т. 56, № 2. — С. 68–87. EDN ZKNIAW.

COMPARISON OF METHODS OF HYDROGEN STORAGE AND TRANSPORTATION, IDENTIFICATION OF ADVANTAGES AND DISADVANTAGES, ANALYSIS OF PROMISING AREAS

A.S. Reutskii, PhD, Russian Maritime Register of Shipping, 191186 Russia, St. Petersburg, Millionnaya ul., 7A, e-mail: reuckii.as@rs-class.org

The paper considers the main technically feasible stationary and mobile methods of hydrogen storage. The objective of the study is to analyze the applied and prospective solutions and to define the main criteria for their comparison. The goal of the study is to determine the most suitable hydrogen storage technologies for implementation in marine transport. For this purpose, the research materials of domestic and foreign scientists, as well as relevant guidance documents, were summarized and analyzed. The approach used made it possible to analyze modern hydrogen storage technologies, determine the most suitable ones for implementation in marine transport and compare them using the identified criteria.

Keywords: hydrogen, hydrogen storage, hydrogen transportation, marine hydrogen transportation, liquefied hydrogen, LH_2 , compressed hydrogen gas, CGH_2 , ammonia, NH_3 , methanol, CH_3OH , liquid organic hydrogen carriers, hydrogen states, physical characteristics, chemical characteristics.

For citation: Reutskii A.S. Comparison of methods of hydrogen storage and transportation, identification of advantages and disadvantages, analysis of promising areas. *Research Bulletin by Russian Maritime Register of Shipping*. Vol. 56, No. 2. P. 68–87. EDN ZKNIAW. (In Russ.)

ВВЕДЕНИЕ

В настоящий момент системы хранения водорода в основном создаются на месте его производства или конечного использования [1]. Популярная сейчас концепция использования водорода в качестве экологически устойчивого [2, 3] источника энергии, объединяющая углеродно-нейтральную [4] энергетику и транспорт, нуждается в создании безопасных и практически реализуемых способов его доставки на большие расстояния [5], то есть в мобильных системах хранения водорода [6], доступных для реализации на водном транспорте.

Водород как объект транспортировки создает значительные трудности для разработки цепочек его доставки [7], обусловленные сложностями в производстве, хранении и обращении с ним. Это вызвано его физико-химическими свойствами [8], в первую очередь горючестью и взрывоопасностью в смеси с воздухом, сверхтекучестью, малой плотностью, низкой температурой кипения и охрупчивающим воздействием на некоторые конструкционные материалы [2].

В настоящий момент рассматривается [9] несколько способов транспортировки водорода водным транспортом: в сжатом состоянии (compressed gaseous hydrogen, далее — CGH₂), в сжиженном состоянии (liquefied hydrogen, далее — LH₂), в составе других веществ: аммиака (NH₃), метанола (CH₃OH) и специальных жидких органических носителей водорода (liquid organic hydrogen carriers — далее LOHC). При этом для транспортировки CGH₂ и LH₂ должны использоваться специализированные газовозы, для аммиака — газовозы LPG, для метанола — танкеры-химовозы, для LOHC (например, дибензилтолуола, далее — DBT) — танкеры-продуктовозы. Все эти способы разительно отличаются друг от друга, так как предусматривают использование различной инфраструктуры (судов, оборудования) и требуют различных энергетических затрат для приведения водорода в транспортируемое состояние и его хранение в процессе транспортировки.

Таким образом, актуальным становится анализ основных существующих способов хранения водорода, как стационарных, так и мобильных. Целью исследования являлся анализ применяемых и перспективных способов хранения водорода и определение пригодных для использования на водном транспорте. Сопоставление методов транспортировки водорода, определение их преимуществ и недостатков представляет собой актуальную задачу, решаемую при помощи определения набора критериев и их дальнейшего сравнения. Таким образом, задачами работы являются анализ современных технологий хранения водорода, определение перечня критериев для их сравнения, сравнение при помощи выявленных критериев и определение технологий, наиболее пригодных для реализации на морском транспорте.

1. АНАЛИЗ СОВРЕМЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ХРАНЕНИЯ ВОДОРОДА

Водород может храниться и транспортироваться различными способами, ведь он, как и любой газ, обладает свойствами сжимаемости и сжижаемости, а также может вступать в реакции с другими веществами. Основные технологии хранения водорода разделяют на физические, физико-химические (сорбционные) и химические (рис. 1). В физических системах плотность слабо взаимодействующих между собой неполярных молекул водорода повышают с помощью физического воздействия, за счет энергии на сжатие водорода до высоких давлений или на его охлаждение ниже критической температуры (33,2 К). Отличительной особенностью физических систем хранения является отсутствие взаимодействия между атомами водорода и материала (устройства) среды хранения. Физико-химические методы хранения и выделения водорода основаны на его способности к обратимому взаимодействию с материалом хранения. Химические способы хранения предполагают хранение водорода в виде других стабильных веществ, содержащих в своих молекулах атомы водорода и требующих сопоставимых с другими способами хранения водорода затрат энергии на осуществление реакций синтеза и разложения.

Несмотря на большое разнообразие способов хранения водорода, каждый из них имеет свои области применения. Например, используемый в топливных элементах (далее — ТЭ) водород должен иметь высокую чистоту (отсутствие посторонних примесей), его расход относительно высок, а при производстве карбамида — напротив, требования к качеству водорода низкие и дозаправка необходима лишь несколько раз в год. В первом случае будут востребованы такие способы хранения, при которых происходит сопутствующая очистка водорода (LH₂, LOHC), а во втором — все остальные. Таким образом, для соответствия различным ограничениям процессов, использующих водород, могут быть востребованы различные технологии его хранения [4]. Рассмотрим каждый способ хранения более подробно и определим пригодные для использования на морском транспорте.



Рис. 1. Основные технологии хранения водорода

1.1. Физические способы хранения водорода

Под физическим хранением водорода подразумеваются способы хранения, при которых не происходит химических взаимодействий между молекулами водорода и содержащими их материалами. Это в первую очередь уплотненные состояния водорода: сжатый (CGH_2) и сжиженный (LH_2) (рис. 2).



Рис. 2. Физические технологии хранения водорода

Идеальная физическая система хранения газа характеризуется его предельным массовым содержанием (100 мас.%), но чем больше давление и температура приведения газа в компактное состояние отличается от нормальных условий (273 К (0 °C) и 101,325 кПа), тем больше необходимо энергетических затрат на приведение его в компактное состояние и поддержание этого состояния и тем ниже реальная емкость хранилища. По этой причине, вне зависимости от способа физического хранения, для приведения водорода в компактное сжатое или сжиженное состояние требуются значительные затраты энергии [2].

Сжатый водород в подземных хранилищах. Способ хранения водорода в подземных хранилищах газа (далее — ПХГ) играет важную роль в так называемой водородной энергетике, так как она требует создания хранилищ для единовременного запаса большого количества энергии. Если в качестве критерия эффективности любого хранилища газа выбрать отношение объема запасаемого газа к затратам на создание хранилища, то в случае водорода наиболее эффективным способом организации его хранения окажется сжатие в естественных или искусственно созданных хранилищах. Так, в исследовании 2013 г. [1] были проанализированы 48 стационарных гибридных установок по производству водорода, вместимость которых составляла от 0,2 до 1350 кг водорода. Большая часть этих установок (88 %) содержали водород в сжатом виде, а остальные в сжиженном, в виде гидридов различных металлов и в интерметаллических соединениях. Это говорит о том, что технология хранения водорода в сжатом виде представляет собой зрелую и, в рамках сложившегося рынка, привлекательную технологию (по отношению к другим способам хранения). Существует пять типов подземных хранилищ водорода: подземные хранилища природного газа и нефти, водоносные горизонты, соляные пещеры, выведенные из эксплуатации рудники и каменные пещеры. Хранилища водорода часто создают в подходящих по размеру и другим параметрам соляных пещерах (рис. 3а), так как соль не вступает с водородом в химическую реакцию. История хранения водорода в соляных шахтах и пещерах насчитывает уже несколько десятилетий: в США, в штате Техас, водород хранят в двух пещерах объемом 580 000 м³ и 566 000 м³ с 1983 г., в Тиссайде, Великобритания, — в трех пещерах объемом по 70 000 м³ с 1972 г. При этом внутри хранилища поддерживается давление 55–170 бар [10], что позволяет уплотнить водород до значений 3,47 и 11,85 кг/м³ соответственно.

Водородные ПХГ также размещают в бывших нефтяных месторождениях под давлением 110–280 бар, что позволяет уплотнить водород до значений 7,4–20,32 кг/м³ соответственно. Этот тип хранилищ имеет долгий и безаварийный опыт эксплуатации [11], а по значениям внутреннего давления схож с рукотворным подземным хранилищем, например облицованной каверной (lined rock cavern), схематически представленной на рис. 3б [12, 13].

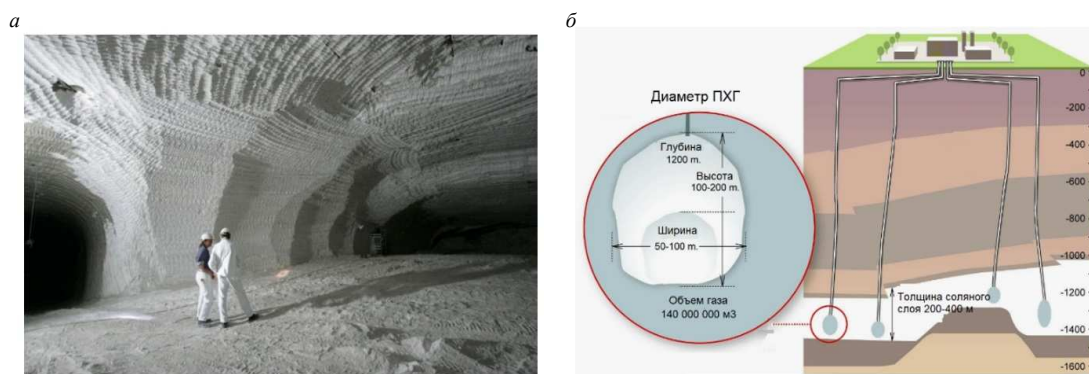


Рис. 3. Подземная соляная выработка (а); вариант подземного хранилища газа в соляной каверне [14] (б)

По сравнению с наземными хранилищами, ПХГ обладают рядом достоинств: низкой удельной стоимостью строительства (относительно наземных хранилищ), низкой вероятностью утечек, быстрой загрузкой и разгрузкой хранилища, а также меньшим риском загрязнения окружающей среды.

Сжатый водород в наземных хранилищах. CGH_2 в крупнотоннажных хранилищах может храниться как под уровнем земли, так и над ним. Давление CGH_2 в большинстве наземных хранилищ обычно составляет менее 100 бар, что объясняется большими затратами на сжатие и другими эксплуатационными расходами, вызванными повышенными требованиями к материалу, из которого изготовлено хранилище [15].

Сжатие водорода давлением 55 МПа приводит к уменьшению его объема на 30 %, а давлением 103 МПа — на 55 % [10], в то время как взрывоопасность таких систем многократно увеличивается, в том числе из-за чрезвычайно высокой диффундирующей способности водорода проникать через подвижные уплотнения и арматуру. Вместе с тем контакт водорода с металлами вызывает их охрупчивание, что может привести к разрушению стальных баллонов с водородом при давлении существенно более низком, чем расчетное. При этом даже незначительная утечка водорода из баллонов через микротрещины в закрытых помещениях представляет большую опасность, чем утечка бензина или природного газа [16] из-за широкого диапазона воспламеняемости водорода в смеси с воздухом (4–75 %_{об.}). Увеличение толщины стенок приводит к повышению массогабаритных характеристик баллона и, соответственно, к нежелательному снижению массового содержания хранящегося в нем водорода. При хранении CGH_2 в наземных хранилищах, состоящих

из стальных баллонов (рис. 4а), при сжатии водорода повышение плотности газа ограничивается габаритами баллона и свойствами его материала [17–19] в соответствии со следующей формулой:

$$d/D = \Delta P / (2\sigma + \Delta P), \quad (1)$$

где d — толщина стенки,
 D — внешний диаметр баллона,
 ΔP — избыточное давление,
 σ — предел прочности материала на растяжение.

Эта зависимость тем сильнее, чем ниже плотность конструкционного материала баллона. В определенный момент дальнейшее увеличение толщины стенок баллона становится нецелесообразным. По этой причине для небольших количеств CGH_2 чаще всего используют стандартные стальные баллоны с рабочим давлением до 15–20 МПа. Механическая работа, необходимая для сжатия до этого давления, составляет ~ 2–3 кВт·ч/кг сжимаемого водорода, а общие энергозатраты на хранение водорода в стандартных баллонах превышают 10–15 % от его теплотворной способности, при этом реальное содержание водорода в них не более 1,2–1,5 %_{мас.} (отношение массы хранимого водорода к массе хранилища), а плотность составляет 0,010–0,012 г/л. Использование баллонов высокого давления (выше 60 МПа), изготовленных из композиционных материалов, позволяет довести содержание в них CGH_2 до 6 %_{мас.}, а плотность до 0,03–0,04 кг/л (рис. 4б). Это частично решает проблему избыточного веса системы хранения, но приводит к значительному росту ее стоимости, а также к повышению взрывоопасности, так как водород обладает высокой способностью диффундировать через композиционные материалы [20, 21]. При этом следует отметить, что даже в таком варианте энергоэффективность сжатого водорода ниже, чем у бензина: 1 л бензина может давать в шесть раз больше энергии (31,7 МДж/л или 8,8 кВт·ч/л), чем 1 л водорода, сжатого до 70 МПа (4,7 МДж/л или 1,3 кВт·ч/л) [22].

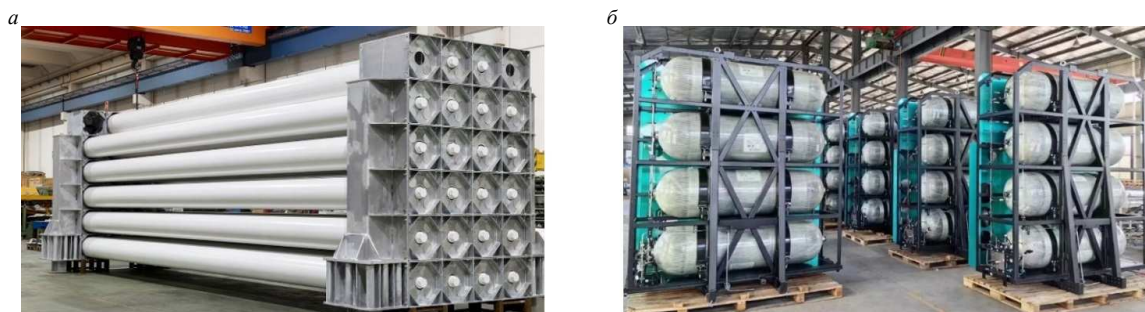


Рис. 4. Металлические баллоны для хранения водорода под давлением, объединенные в кассету (а); система хранения из баллонов высокого давления (выше 60 МПа), изготовленных из композиционных материалов [23] (б)

Более безопасно хранение CGH_2 в микрокапсулированном виде под давлением 35–65 МПа, где в роли баллонов выступают стеклянные микросферы диаметром 5–500 мкм и толщиной стенки ~ 1 мкм (рис. 5а). Они имеют низкую объемную плотность и могут заполнять пространство практически любого размера и формы. Вмещаемый объем водорода перераспределяется на множество меньших объемов, что исключает мгновенный выброс большого количества газа при аварийном разрушении емкости. Заправка водородом осуществляется в интервале температур 200–400 °С, при которых стенки стеклянных микросфер становятся проницаемыми для водорода. Затем микросферы охлаждают до комнатной температуры и помещают в емкость для транспортировки под атмосферным давлением. В этих условиях проницаемость стекла уменьшается и водород остается внутри микросфер. В отдельных случаях содержание водорода может достигать 10 %_{мас.}, а объемная плотность — 0,02 кг/л, что сопоставимо с показателями композитных газовых баллонов. Однако выделение водорода с необходимой скоростью из микросферы диаметром 80 мкм для подачи на топливный элемент достигается только при температуре ~ 600 °С, при которой существенно падает прочность стекла. Эта сложность в совокупности с потенциальными потерями в процессе транспортировки и эксплуатации из-за механических разрушений стеклянных микросфер ограничивает их перспективы как массового способа хранения водорода [17, 24].

Сжатый водород в мобильных хранилищах. В настоящее время автомобильная транспортировка CGH_2 осуществляется с использованием грузовых автомобилей с малыми стальными баллонами при давлении 20–30 МПа емкостью до 90 л или большими бесшовными баллонами емкостью до 3000 л при давлении 20–25 МПа. Специализированный перевозящий CGH_2 грузовик весом 40 т имеет полезную грузоподъемность около 400 кг водорода из-за значительного веса баллонов, работающих под давлением 20 МПа (рис. 5б).

Для автомобильных перевозок водорода дополнительно применяются емкости, изготовленные из композиционных материалов с рабочим давлением 20–35 МПа и грузоподъемностью до 900 кг водорода. Согласно отчету [25], из-за низкой объемной плотности перевозка CGH_2 под давлением колесным транспортом экономична только в пределах 300 км от места производства, так как данный способ имеет ряд недостатков: относительно большие затраты энергии на сжатие, угрозы, связанные с безопасностью, низкое значение запасаемой удельной энергии, а также относительно высокая стоимость транспортировки.

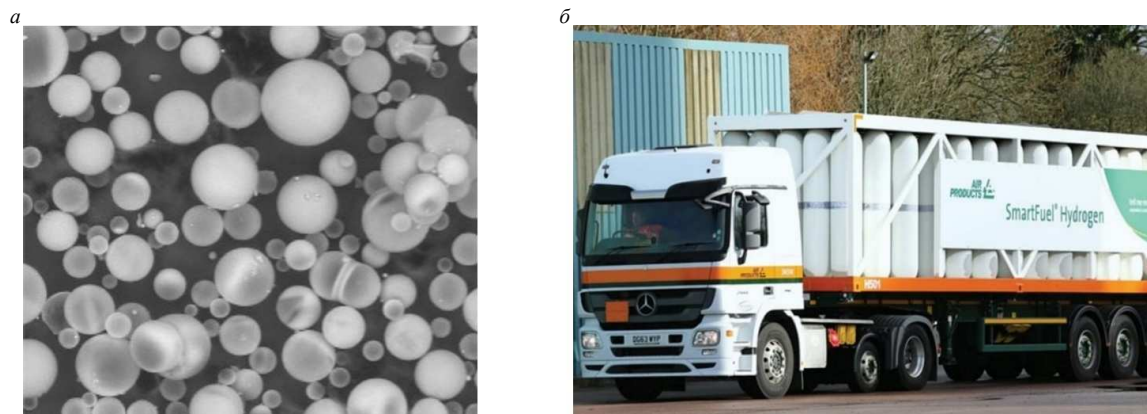


Рис. 5. Стекланные микросферы диаметром 300 мкм для хранения водорода под давлением [26] (а); автотрейлер для транспортировки водорода с баллонами высокого давления [27] (б)

Сжиженный водород. Хранение водорода в сжиженном виде применяется в коммерческих стационарных хранилищах и распространено в космической отрасли (рис. 6а).

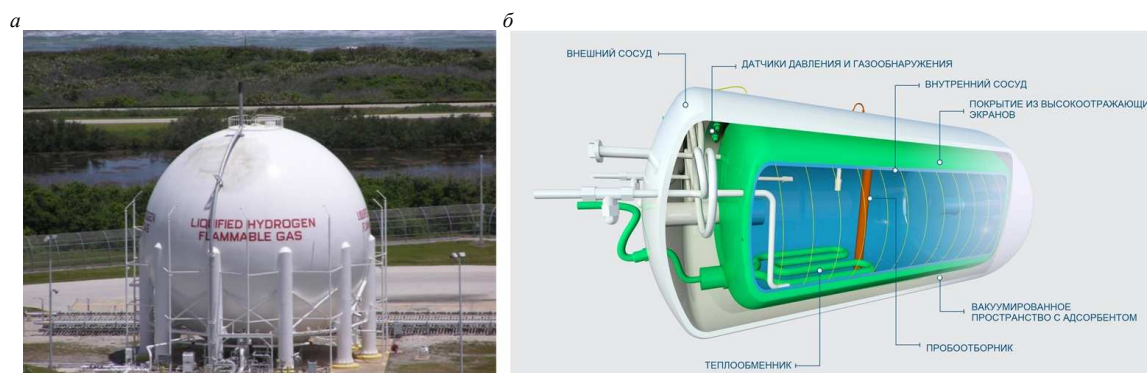


Рис. 6. Стационарная емкость для хранения сжиженного водорода NASA, 3218 м³ (а); устройство вакуумной изоляции емкости для хранения LH_2 (б)

Критические параметры водорода при сжижении: температура $-240,2^\circ\text{C}$, давление 12,8 атм, критическая плотность $0,0312\text{ г/см}^3$ и критический объем $66,95\text{--}68,9\text{ см}^3/\text{моль}$ ($0,033\text{ м}^3/\text{кг}$). Указанными значениями критических параметров объясняются большие затраты энергии при сжижении и хранении. Ключевыми проблемами при хранении криогенного водорода являются:

- энергоемкий ($10\text{ кВт}\cdot\text{ч/кг}$) и капиталоемкий процесс сжижения (до 40–50 % капитальных затрат всего проекта наземного хранения приходится на систему хранения жидкого водорода) [28];
- повышенное образование отпарного газа, вызванное притоком тепла от окружающей среды.

В системах хранения и сжижения используются специализированные хранилища (сосуды Дьюара большого объема), оборудованные теплоизоляцией с высочайшими теплоизоляционными свойствами, а также низким отношением поверхности оболочки к их внутреннему объему, — сферические емкости и другие поверхности, образованные телами вращения.

Стационарные и мобильные емкости LH_2 изолированы с помощью вакуумной изоляции, включающей (рис. 6б):

- изолированное пространство с двойной оболочкой, в котором статический или динамический (для больших хранилищ) вакуум высокого разрежения ограничивает теплопередачу конвекцией за счет своей низкой теплопроводности;

- покрытие из высокоотражающих экранов, которое предотвращает теплопередачу излучением;
- адсорбент (молекулярное сито) для достижения вакуума высокого разрежения при низкой температуре за счет адсорбции газов и влаги в вакуумируемом пространстве.

Сжиженный водород в мобильных хранилищах. Автомобильная перевозка LH_2 на большие расстояния выглядит более привлекательной, чем CGH_2 . Автотрейлеры с криогенным жидким водородом могут перевозить до 5 т LH_2 , их емкости способны работать при давлении до 1,2 МПа. Несмотря на изолированную конструкцию мобильных хранилищ, во время транспортировки может происходить испарение водорода до 0,5 %_{мас.} в сутки. При загрузке и выгрузке LH_2 также происходит испарение до ≈ 5 %_{мас.} перевозимого водорода. Размер автотрейлера LH_2 (рис. 7а), с одной стороны, ограничен максимальными габаритами дорожного транспортного средства, а с другой — его максимально допустимой нагрузкой на ось. Как правило, масса автотрейлера порожнем составляет ~ 25 т, а полезная грузоподъемность — от 2 до 5 т LH_2 .

Перевозка LH_2 в железнодорожных цистернах объемом 107 м³ компании Linde началась в 1960-х гг. Межстенное пространство между внутренней и внешней емкостями было вакуумировано и снабжено системой теплоизоляции с использованием гранулированного перлита и чередующихся слоев алюминиевой фольги и бумаги. Скорость испарения составила 0,2%_{мас.} в сутки. Американская компания Praxair в настоящий момент эксплуатирует 16 железнодорожных вагонов LH_2 . Они эксплуатируются при рабочем избыточном давлении 55 кПа с системой регулирования давления, давление сброса составляет 117 кПа. Количество LH_2 , перевозимого в железнодорожной цистерне на большое расстояние ($> 1\,000$ км), составляет около 70 т. На рис. 7б показана конструкция железнодорожной цистерны для LH_2 от китайской компании CRRC Xian Co Ltd. Теплоизолированная цистерна 85 м³ рассчитана на грузоподъемность 5 т водорода.

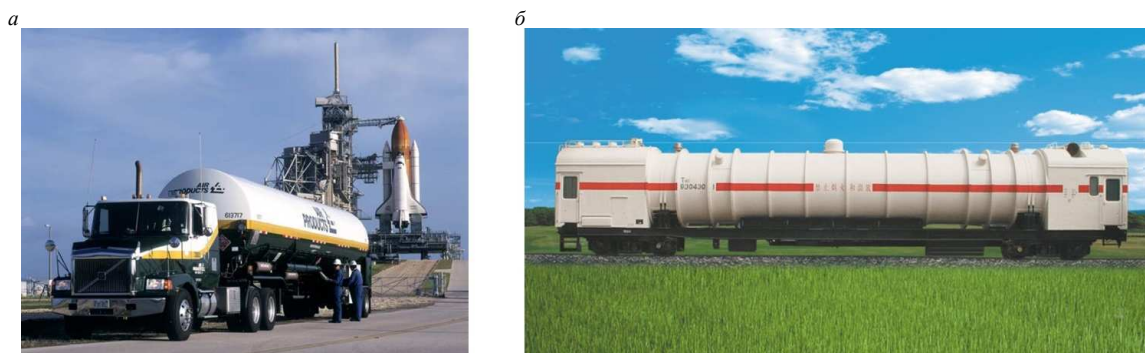


Рис. 7. Автотрейлер LH_2 (а); ж/д цистерна Т-85-типа CRRC Xi'an Co., Ltd (КНР) [29] (б)

История транспортировки LH_2 водным транспортом, как и в случае с железнодорожным, началась еще в 1960-х гг. и была тесно связана с космическими программами разных стран.

Первый опыт транспортировки LH_2 на водном транспорте получило Национальное управление по аэронавтике и исследованию космического пространства США (NASA), использующее жидкий водород в качестве топлива как в своих завершенных космических программах (Apollo, Space Shuttle), так и в планируемых (Artemis). На рис. 8а показан процесс буксировки баржи с установленной на ее палубе емкостью с LH_2 . Несмотря на оригинальность технологии, конструкция речного барже-буксирного состава исключает всякую возможность использования ее в качестве прототипа для морских перевозок водорода [9].

В отличие от технологии CGH_2 , технология LH_2 уже успешно реализована в проекте морской транспортировки водорода HySTRA. В рамках этого проекта реализована цепочка поставок водорода, производимого из бурого угля, из Австралии в Японию. Основным элементом цепочки поставок является судно для перевозки LH_2 под названием Suiso Frontier [30], спроектированное и построенное компанией Kawasaki Heavy Industry (Япония) под наблюдением Class NK (рис. 8б). Судно имеет длину 116 м, ширину 19 м, высоту борта 10,6 м и осадку 4,5 м. Численность экипажа составляет 25 человек, скорость 13 уз. Два грузовых танка имеют объем 1250 м³, что эквивалентно около 88 т жидкого водорода. Особый интерес представляет собой грузовая система, выполненная в виде цилиндрических танков типа С (по классификации ИМО) и оборудованных двустенной вакуумной криоизоляцией, что делает их, по сути, сосудами Дьюара, способными работать под избыточным давлением. Также судно имеет развитую балластную систему, позволяющую ему соответствовать требованиям к мореходности, в первую очередь к качке и остойчивости. Водород в качестве топлива на судне не используется, поэтому судовая энергетическая установка представлена тремя дизель-генераторами Daihatsu 6DE-23 суммарной электрической мощностью 3600 кВт, приводящими в движение два электрических гребных мотора суммарной мощностью 2720 кВт,



Рис. 8. Буксир Clermont II доставляет жидкий водород через систему каналов в космическом центре NASA «Стеннис» (а); газозов для транспортировки сжиженного водорода Suiso Frontier (б)

обеспечивающих вращение одного винта фиксированного шага, что позволяет судну развивать заявленную скорость в 13 уз. Также на судне присутствует одно подруливающее устройство туннельного типа. В настоящий момент это единственное судно-водородовоз, хотя в последние годы было разработано несколько проектов подобных судов, подробнее с ними можно ознакомиться в [9].

Трубопроводная передача сжиженного водорода. В настоящий момент накоплен достаточный опыт передачи LH_2 при помощи криогенных трубопроводных систем. Трубопроводы для перекачки криогенного жидкого водорода должны соответствовать экстремально низкой температуре LH_2 и иметь конструкцию с двойными стенками и вакуумной изоляцией. В качестве материала внутренней линии используется нержавеющая сталь с прокладками с низкой теплопроводностью. Внутренняя линия выполняет функцию опоры для вакуумной рубашки. Из-за своей высокой стоимости, линейно возрастающей с увеличением расстояния передачи, трубопроводы LH_2 экономически привлекательны только для передачи LH_2 между емкостями на небольших расстояниях. В этом случае передача водорода осуществляется за счет перепада давления, а не с помощью насосов. Существуют жесткие или гибкие варианты криогенных трубопроводов. Основными проблемами, помимо теплопритоков, являются механические нагрузки на внутреннюю магистраль из-за термического сжатия/расширения, гидроударов и колебаний давления. Поэтому криогенные трубопроводы должны быть спроектированы соответствующим образом, чтобы компенсировать возможные нагрузки и не разрушаться в результате их возникновения.

При организации захлаживания внутри трубопровода с LH_2 образуется двухфазный поток, который горизонтально дифференцируется на кипящий слой, жидкость и пар (рис. 9а) [31]. Это явление возникает там, где требуется охлаждение перед началом самого процесса заправки (рис. 9б) [29], чтобы избежать возникновения недопустимых термических напряжений и попадания газовой фазы в емкость для хранения LH_2 . Для перекачки LH_2 по трубопроводу существует два способа:

- повышение давления, естественное или принудительное (путем испарения LH_2 через небольшой внешний теплообменник). Основные недостатки — занимает много времени; повышение давления в обоих хранилищах требует сброса давления и приводит к потере части груза;
- с использованием центробежного криогенного насоса; основные недостатки — высокая стоимость насоса и необходимость его частого технического обслуживания из-за кавитации.

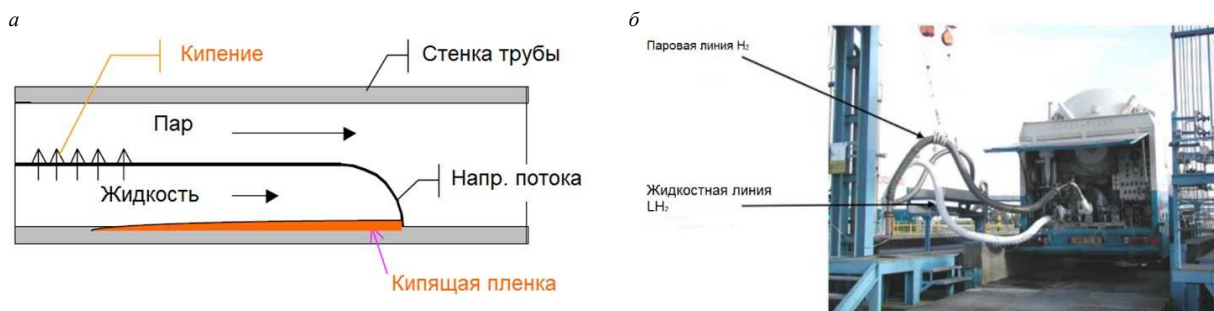


Рис. 9. Двухфазный поток в трубопроводе LH_2 (а); передача LH_2 с помощью авторейлера (б)

Таким образом, физические способы хранения водорода в настоящее время являются технически наиболее освоенными и могут использоваться в качестве основы для создания грузовой системы на водном транспорте. Рассмотренный метод хранения водорода в виде CGH_2 характеризуется относительной простотой процесса сжатия и легкостью перегрузки газа в емкость, а также низкими энергозатратами на подачу газа потребителю. При этом способ CGH_2 требует больших инфраструктурных затрат для создания инфраструктуры по сжатию и хранению. Емкость систем хранения CGH_2 по водороду в различном исполнении не превышает 1–2%_{мас.}, а хранимый водород имеет ту же степень чистоты, что и при их заполнении.

Криогенный способ хранения обеспечивает намного более высокую плотность водорода (70,8 кг/м³), чем у сжатого водорода в баллонах [32]. Преимуществом способа хранения LN_2 является очистка водорода от химических примесей в процессе сжижения. Критическое давление хранения жидкого водорода составляет 1,3 МПа, поэтому требования к прочности и материалоемкости стенок криогенных контейнеров для хранения LN_2 не такие жесткие, как для сосудов высокого давления с CGH_2 . Соответственно, потери емкости устройства при хранении LN_2 меньше, что позволяет достичь высокой массовой плотности хранения.

Основным недостатком криогенного водорода являются большие затраты энергии на его сжижение (~10 кВт·ч/кг H_2) и хранение. Как криогенная жидкость водород существует в очень узком интервале температур, от точки кипения –252,77 °С до точки замерзания –259,19 °С, когда водород переходит в твердое состояние. При росте температуры выше температуры кипения водорода происходит скачкообразный переход из жидкости в газообразное состояние. Поэтому, чтобы избежать местных перегревов, перед заполнением жидким водородом криогенные емкости предварительно охлаждают до температуры, близкой к точке кипения водорода (4 К, –253 °С), для чего используют часть уже охлажденного водорода, что приводит к дополнительным затратам. Общие энергетические затраты на сжижение, перегрузку и хранение водорода составляют 30–50 % от его теплотворной способности [33, 34]. Вместе с этим хранение и перегрузка LN_2 сопровождаются его неизбежными потерями, связанными с испарением, что делает использование метода в закрытых помещениях более взрывоопасным, чем метод хранения в стальных баллонах.

1.2. Физико-химическое (сорбционное) хранение водорода

Физическая сорбция — это обратимый экзотермический процесс, при котором газ может легко адсорбироваться на поверхности вещества сорбента посредством ван-дер-ваальсовых связей и позже высвобождаться без потерь. Насыщение сорбента водородом, как правило, происходит при повышенном давлении, без которого не происходит проникновение молекул водорода в мельчайшие поры материала. Вместе с тем, поскольку энергия связи водорода и адсорбента слаба, высокая емкость по водороду достигается только при низких температурах (обычно при $\approx -195,8$ °С). При нагреве адсорбента происходит обратный процесс десорбции, и адсорбент постепенно отдает накопленный водород. При нормальных условиях емкость по водороду в адсорбционных материалах не превышает 1–3 %_{мас.} и зависит от материала адсорбента и области применения. Среди широкого спектра материалов, наиболее известными адсорбентами для хранения водорода являются пористые углеродные материалы, металлоорганические соединения, пористые полимерные материалы и цеолиты [35] (рис. 10).



Рис. 10. Физико-химические (сорбционные) технологии хранения водорода

Таким образом, физико-химические способы хранения водорода и системы на их основе находятся в стадии разработки и испытаний лабораторных образцов, поскольку интерес к данным способам повышения плотности водорода возник сравнительно недавно. Кроме того, большинство доступных в настоящее время адсорбентов имеют низкую плотность энергии и нуждаются в сложной системе терморегулирования для отвода тепла, выделяемого при абсорбции водорода, что ограничивает их потенциальное использование в качестве грузовой или топливной системы на транспортных судах.

1.3. Химическое хранение водорода

В отличие от рассмотренных выше систем хранения, основанных на физическом и физико-химическом типах взаимодействия водорода с материалом хранения, в химических системах водород естественным образом содержится в структуре органического соединения, поэтому его содержание и плотность не зависит от воздействия извне и определяется природой и строением вещества. При химическом хранении водорода возникают сильные связи между водородом и сохраняющим его химическим веществом (носителем водорода), намного сильнее ван-дер-ваальсовых связей, возникающих при его сорбционном хранении. В зависимости от агрегатного состояния носителя водорода, его химическое хранение разделяют на твердые гидриды, жидкие органические носители, а также другие вещества, молекулы которых содержат водород, — аммиак и метанол (рис. 11).



Рис. 11. Химические технологии хранения водорода

Твердые гидриды можно условно разделить на гидриды металлов и сложные гидриды. Гидриды металлов включают металлы, сплавы и стехиометрические неметаллические соединения, обладающие способностью диссоциировать молекулы водорода на своей поверхности и поглощать атомы водорода в своей кристаллической структуре. Исследование [36] показывает, что поглощение/десорбция водорода гидридами металлов может происходить в широком диапазоне давлений и температур. Они могут поглощать и освобождать водород при комнатной температуре и давлении в несколько бар. Однако медленная скорость реакции, низкая теплопроводность и высокая стоимость гидридов металлов ограничивают их применение для стационарного и мобильного (на морских транспортных судах) хранения больших объемов водорода [37].

Сложные гидриды, обычно содержащие более одного металла или металлоида, представляют собой соли металлов. Многие сложные гидриды обладают превосходной емкостью для хранения водорода благодаря относительно легким элементам, а некоторые могут даже превышать емкостные характеристики хранения водорода в виде LH_2 . Например, LiBH_4 содержит 18 %_{мас.} водорода [38]. Давление газообразного водорода при его хранении в гидридах металлов при комнатной температуре не превышает несколько атмосфер,

поэтому металлогидридный способ имеет важное преимущество в части безопасности. Главным его достоинством является компактность оборудования, поскольку плотность упаковки атомов водорода в матрице металла (0,09–0,10 кг/л) выше, чем у LH_2 , и сравнима с плотностью ядер водорода в воде (0,11 кг/л). Однако большая молекулярная масса металлов придает этому методу хранения водорода значительные массогабаритные характеристики, что существенно снижает емкость хранящегося водорода по отношению к массе устройства хранения. Проблема охрупчивания металла при взаимодействии с водородом дополнительно усложняет разработку металлогидридных систем хранения водорода.

Эти и другие факторы, такие как трудности в безопасном обращении, высокая стоимость редкоземельных металлов, низкая скорость процесса (де)гидрирования, требуемые для него высокие температуры и давления (200–400 °C и 10–40 МПа) ограничивают использование сложных гидридов для стационарного и мобильного (на морских транспортных судах) хранения больших объемов водорода [39]. По этим причинам использование гидридов металлов в качестве системы хранения на водном транспорте нецелесообразно.

Жидкие органические носители, а также другие вещества, молекулы которых содержат водород. В виде органических соединений водород при нормальных условиях может безопасно храниться и транспортироваться на большие расстояния, а при необходимости выделяться и трансформироваться в другие виды энергии. Примерами химических соединений, содержащих в своем составе связанный водород и способных в присутствии катализатора при повышенной температуре его выделять, служат аммиак и метанол. Основным преимуществом использования водорода в виде данных соединений является высокая объемная плотность (~ 0,10 кг/л) и высокая массовая плотность его хранения — 17,6 %_{мас.} в случае аммиака и 12,6 %_{мас.} в случае метанола.

По энергоемкости единицы объема жидкий безводный аммиак более чем в шесть раз уступает чистому водороду и примерно вдвое — бензину и дизельному топливу. Несмотря на то, что аммиак получают буквально из воздуха, его производство весьма энергоемкое. Циркуляция по процессу Габера–Боша [40] позволяет получать аммиак со 100%-ным выходом, но при среднем расходе электроэнергии ~3,2 кВт·ч/кг, а для получения 1 кг водорода затрачивается 5,65 кг аммиака.

Недавно в качестве перспективных жидких органических носителей водорода (ЛОНС) для стационарного применения были предложены смеси дибензилтолуола (DBT), которые десятилетиями широко использовались в качестве теплоносителей [41]. DBT может быть гидрирован в пергидродибензилтолуол (Н18-DBT) металлами платиновой группы Pt при температуре около 140 °C [42], а обратный процесс может быть осуществлен при температуре 270–320 °C [41]. Данный носитель обладает рядом преимуществ для применения в системах ЛОНС, включая высокую массовую плотность хранения водорода (6,2 %_{мас.}), низкую токсичность и термостабильность. DBT наиболее привлекателен для хранения больших объемов водорода, поскольку он легко интегрируется с существующими промышленными процессами, в которых производятся водородсодержащие газовые смеси. Способность ЛОНС к гидрированию чувствительна к процессу эксплуатации. Сообщалось [42], что ее производительность снижается до 23 % от ее теоретического значения после нескольких циклов (де)гидрирования, но в недавнем исследовании [43] была продемонстрирована достигнутая стабильная производительность по водороду при длительных циклах (де)гидрирования с использованием специально разработанного реактора смешивания.

Массовая плотность хранения водорода ЛОНС значительно ниже, чем у аммиака и метанола. С другой стороны, в ЛОНС процесс (де)гидрирования может происходить при более низких температурах. При дегидрировании аммиака/метанола необходимо отделить водород от газообразного N_2 или CO_2 , которые будут фактически отходами производства, чего не наблюдается в случае с ЛОНС. И наконец, в самом большом в Европе хранилище водорода (1800 т/год), которое планируется создать в г. Дормаген (Германия), хранение будет осуществляться с помощью ЛОНС [43].

Таким образом, некоторые химические способы хранения водорода являются в настоящий момент перспективными: ЛОНС, аммиак и метанол. Эти химические вещества освоены в производстве, обладают отличной совместимостью с существующей инфраструктурой и могут использоваться для непрерывной доставки и распределения водорода. При этом как ЛОНС, так и CH_3OH с NH_3 могут перевозиться на морском транспорте и имеют свои сильные и слабые стороны с точки зрения их физико-химических свойств, а выбор конкретной технологии в конечном счете зависит от стоимости и сценариев их применения. В целом, технологии физического хранения водорода «не дотягивают» до объемных плотностей, которые могут быть достигнуты при химическом хранении, из-за большого ван-дер-ваальсова размера молекулярного водорода в первом случае по сравнению с размером атомарного водорода во втором, и они, как правило, требуют низких температур и/или высоких давлений. Существенным преимуществом аммиака и метанола перед твердыми гидридами является совместимость с существующими системами транспортировки химических веществ, в том числе и на морском транспорте.

2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПЕРЕЧНЯ КРИТЕРИЕВ ДЛЯ СРАВНЕНИЯ СПОСОБОВ ХРАНЕНИЯ И ТРАНСПОРТИРОВКИ ВОДОРОДА НА ВОДНОМ ТРАНСПОРТЕ

Выявленные способы хранения и транспортировки водорода значительно отличаются друг от друга технически, имеют свои положительные и отрицательные аспекты. Их сравнение не может осуществляться лишь по какому-либо одному критерию, поэтому выбор способа хранения и транспортировки водорода должен основываться на технико-экономическом расчете, заделом для которого может выступать перечень представленных ниже критериев. Проведенный анализ позволил определить перечень существующих технологий хранения водорода, пригодных к использованию на водном транспорте:

- в сжатом виде (CGH_2);
- в сжиженном виде (LH_2);
- в виде жидких органических носителей водорода (ЛОНС);
- в виде аммиака (NH_3);
- в виде метанола (CH_3OH).

Сравнение представленных технологий хранения водорода невозможно выполнить без анализа их с точки зрения:

- емкости (т.е. относительной вместимости по водороду);
- энергетических затрат на специальные подготовительные меры (производство, сжижение или сжатие, химические реакции гидрирования/дегидрирования);
- энергетических затрат на хранение водорода;
- капитальных затрат;
- себестоимости транспортировки.

Применительно к морской транспортировке критерий емкости важен для оптимального размещения грузовой системы внутри корпуса судна, то есть повышения коэффициента утилизации подпалубного пространства транспортного судна. Критерий энергетических затрат при хранении важен для понимания требуемого функционала грузовой системы судна, а также его энерговооруженности (мощности судовых потребителей) для выбора оптимального варианта состава энергетической установки. Критерий энергетических затрат при производстве водорода важен для понимания требуемого функционала береговых комплексов, а также потребляемой ими мощности, то есть определения потребности в береговых генерирующих электрическую энергию мощностях. Критерий капитальных затрат на основные компоненты систем хранения/гидрирования водорода важен для понимания номенклатуры основных компонентов систем хранения/производства водорода.

3. МНОГОКРИТЕРИАЛЬНОЕ СРАВНЕНИЕ СПОСОБОВ ХРАНЕНИЯ И ТРАНСПОРТИРОВКИ ВОДОРОДА

3.1. Сравнение по емкостному критерию

В качестве параметра для оценки эффективности хранилищ водорода с точки зрения их емкости используют величины объемной и массовой плотности хранения. Объемной плотностью хранения называется отношение массы хранимого водорода к его объему, а массовой плотностью хранения — отношение массы хранимого водорода к массе всего хранилища. С точки зрения общей стоимости системы хранения на суше и на морском транспорте предпочтительны большие значения объемной и массовой плотности хранимого вещества (рис. 12а).

На рис. 12б показаны объемные плотности различных технологий хранения водорода относительно давления внутри системы хранения. Из всех рассмотренных технологий только ЛОНС и аммиак с метанолом позволяют хранить водород при атмосферном давлении, в то время как доминирующие в настоящее время подходы к хранению водорода, газообразного и жидкого, требуют значительно более высокого давления. Кроме того, объемная плотность водорода в ЛОНС, в аммиаке и метаноле значительно выше, чем в газовых системах в стандартном промышленном диапазоне давлений.

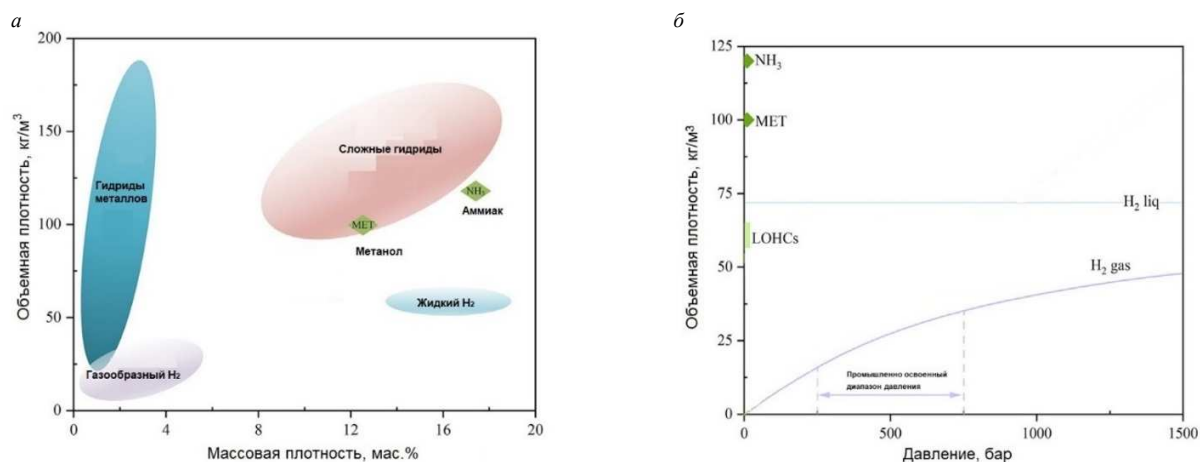


Рис. 12. Массовые и объемные плотности ключевых технологий хранения водорода (а); отношение объемной плотности водорода в различных системах хранения к внутреннему давлению (б)

Определение оптимального с точки зрения удельной грузоподъемности способа перевозки водорода морским транспортом произведено в исследовании [9]. Применительно к каждому из способов хранения водорода на борту была установлена зависимость между размером перевозимой товарной партии водорода с учетом его специфических свойств и технико-эксплуатационными характеристиками судна (рис. 13). Оптимальной удельной грузоподъемностью в рассматриваемом диапазоне водоизмещения (25–80 тыс. т) обладают газовозы LPG и танкеры-химовозы для транспортировки аммиака и метанола соответственно. Концептуальные проекты судов для транспортировки водорода в «чистом» (LH_2 и CGH_2) виде показали самые скромные результаты. Промежуточное положение занимает способ транспортировки водорода при помощи жидких органических носителей. Таким образом, наилучшими с точки зрения емкостного критерия являются (от лучшего к худшему): аммиак, метанол, LOHC, LH_2 и CGH_2 .

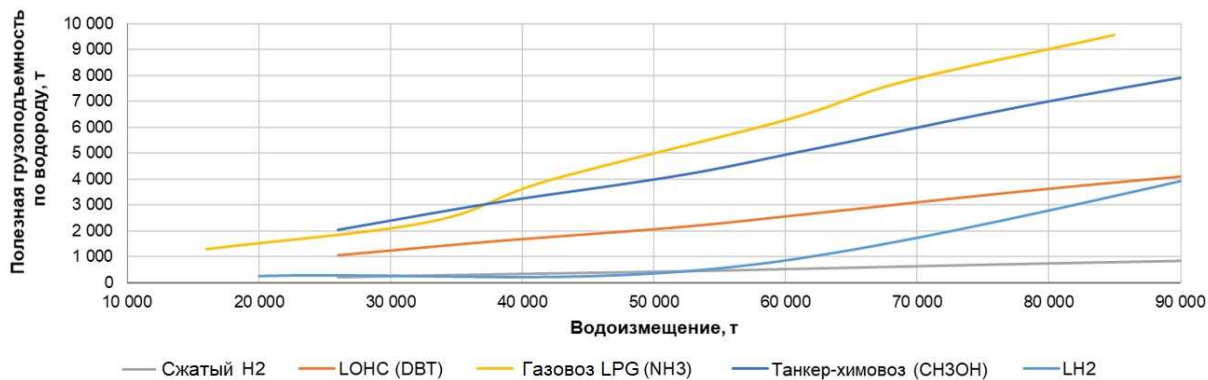


Рис. 13. Графики зависимости полезной грузоподъемности судов от их водоизмещения применительно к различным способам транспортировки водорода: CGH_2 , LH_2 , LOHC (DBT), NH_3 и CH_3OH .

3.2. Сравнение по критерию энергетических затрат на специальные подготовительные меры и хранение

В исследовании [44] представлен сравнительный анализ затрачиваемой на производство 500 т водорода электрической и тепловой энергии для различных технологий его хранения (рис. 14а).

Таблица 1

Энергопотребление для разных систем хранения водорода

Система хранения	Хранение, кВт/кг H ₂		Производство, кВт/кг H ₂	Примечание
	Электроэнергия	Тепло	Электроэнергия/Тепло	
CGH ₂	≈ 2–7	—	—	Зависит от характеристик компрессора [45]
LH ₂	≈ 10–15	—	—	Зависит от эффективности установки сжижения [45]
LOHC	≈ 0,016 (с учетом образовавшегося тепла)	—	Σ ≈ 10,60	Хранение в стационарных хранилищах требует тепла для сохранения стабильного состояния LOHC в зимний период [46]
NH ₃	≈ 4,8	—	≈ 4,5/ ≈ 6,8	Экзотермический процесс, образующееся тепло может быть использовано повторно [47]
CH ₃ OH	≈ 7,25 (direct air capture — DAC), ≈ 3,17 (carbon capture unit — CCU)	≈ 24 (DAC), ≈ 12 (CCU)	≈ 0,34/ ≈ 4,4	Экзотермический процесс, образующееся тепло может быть использовано для улавливания CO ₂ [48, 49]

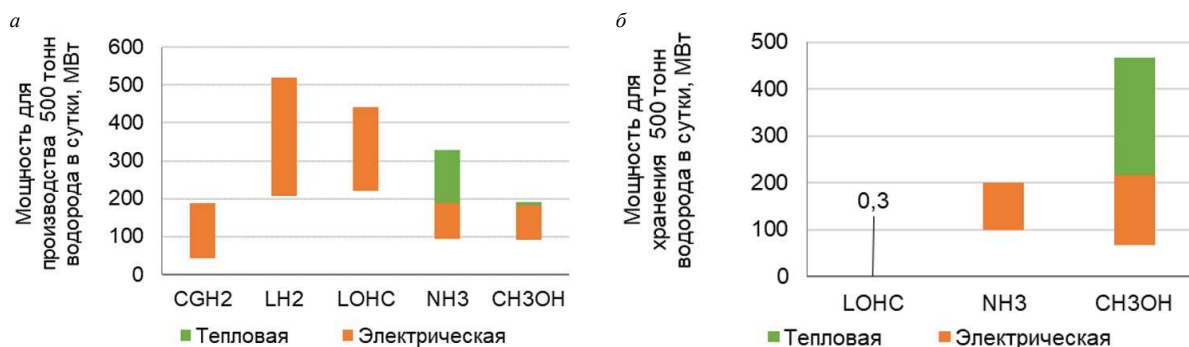


Рис. 14. Сравнительный анализ затрачиваемой на производство 500 т водорода энергии (электрической и тепловой) для различных технологий (а); оценка энергетических затрат для установок гидрирования NH₃, CH₃OH и LOHC (б)

Таким образом, наилучшими с точки зрения энергетических затрат на специальные подготовительные меры являются (от лучшего к худшему): CGH₂, CH₃OH, NH₃, LOHC, LH₂. Наилучшими с точки зрения энергетических затрат на хранение являются (от лучшего к худшему): LH₂, аммиак, метанол, LOHC и CGH₂.

3.3. Сравнение по критерию капитальных затрат

Так как основной задачей исследования является сравнение различных вариантов систем хранения, а не получение абсолютного значения затрат, то в выполненном исследовании принято допущение, что в капитальные затраты входит только стоимость основного оборудования систем хранения (рис. 15).

В табл. 2 и на рис. 16 показаны капитальные затраты на основные компоненты систем производства/хранения водорода производительностью 500 т/сутки.

С точки зрения капитальных затрат наименее капиталоемкими являются системы физического хранения водорода — CGH₂ и LH₂. Намного большими значениями характеризуются аммиак и метанол, средние значения у жидких органических носителей водорода. Такая картина вызвана тем, что при химическом способе выработки и хранения водорода появляется необходимость в переработке и синтезировании других химических веществ.

Таким образом, наилучшими с точки зрения капитальных затрат являются (от лучшего к худшему): CGH₂, LH₂, LOHC, аммиак и метанол.



Рис. 15. Сравнительный анализ затрачиваемой на производство 500 т водорода электрической и тепловой энергии для различных технологий его хранения (а); оценка энергетических затрат для установок гидрирования NH_3 , CH_3OH и LOHC (б)

Таблица 2

Капитальные затраты на основное оборудование системы хранения/производства 500 т водорода

Система хранения	Потребление		Примечание
	Основной компонент	Стоимость, [млн USD/т H_2]	
CGH_2	Компрессор	0,086	Поршневой, производительностью 4 т H_2 /в сут. [50]
	Баллоны для хранения водорода	0,700	500 т водорода [25]
LH_2	Установка сжижения	1,870	Состоит из серии компонентов [25]
	Танк для хранения водорода	0,035	В криогенном резервуаре хранится 500 т водорода [25, 51]
LOHC	Материалы	0,005	Для хранения 500 т H_2 требуется 8700 т LOHC [51]
	Реактор	0,134	Производительностью 500 т H_2 /сут (путем гидрирования 8700 т LOHC) [52]
	Танк хранения	0,003	500 т хранения водорода в сутки [51]
NH_3	Контур синтеза	0,219	Для хранения 500 т H_2 в день необходимо синтезировать 3200 т NH_3 [47]
	Механическое сжатие	0,051	Давление синтез-газа (смеси N_2 и H_2) необходимо увеличить для синтеза 3200 т NH_3 в сутки [47]
	Установка для разделения воздуха	0,094	Установка криогенного разделения воздуха (ASU) на 2637 т N_2 в сутки для синтеза 3200 т NH_3 [47]
	Резервуар для хранения	0,008	500 т водорода в виде аммиака [47]
CH_3OH	DAC	0,267	Требуется 6750 т CO_2 для синтеза 4500 т CH_3OH для хранения 500 т H_2 в день [49, 53]
	Цикл синтеза	0,094	≈ 4500 т синтезированного CH_3OH необходимо для хранения 500 т H_2 [48]
	Резервуар для хранения	0,008	—

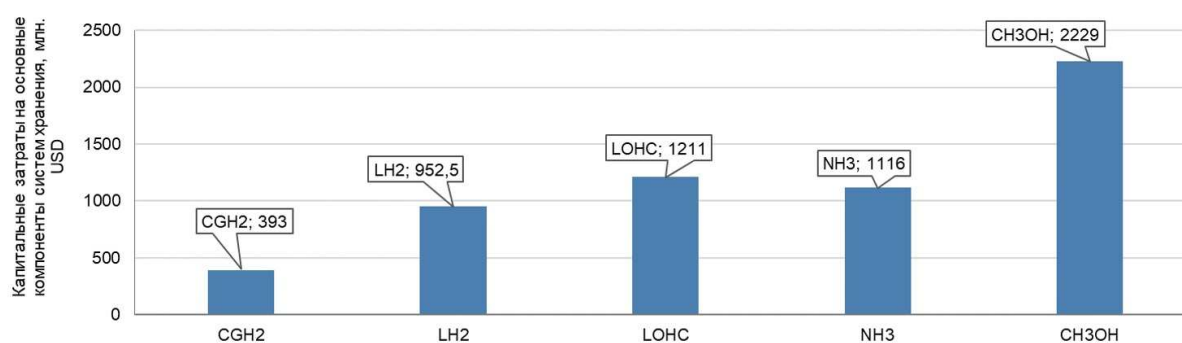


Рис. 16. Капитальные затраты (в USD, 2020) основного оборудования системы хранения 500 т водорода

3.4. Сравнение по критерию себестоимости транспортировки

В исследовании [54] представлены значения себестоимости транспортировки водорода на различных видах транспорта (табл. 3).

Таблица 3

Примерные себестоимости транспортировки водорода в различных агрегатных состояниях

Вид транспортировки	Значение, USD/кг	Транспортный маршрут
Морская LH ₂	0,014	Гастингс (Австралия) — Кобе (Япония), 9172 [55]
Морская (LOHC)	2,171	Австралия — Корея, 8334 км [56]
Дорожная LH ₂	0,392	Квебек — Британская Колумбия (Канада), 500 км [54]
Дорожная CGH ₂	4,498	Шаньси — Шанхай (КНР), 2000 км [57]
Трубопроводная (CGH ₂)	0,904	Синцзянь — Пекин (КНР), 2903 км [58]

Таким образом, наилучшими с точки зрения себестоимости транспортировки являются (от лучшего к худшему): LH₂, аммиак, метанол, LOHC и CGH₂.

ВЫВОДЫ

Сравнительный анализ способов хранения водорода показывает, что ни один из них не имеет кардинального превосходства над альтернативными вариантами. Действительно, среди способов аккумуляции, хранения, транспортировки и генерации водорода на современном техническом и научном уровне технологически развитыми являются только физические способы (LH₂, CGH₂).

На сегодня LH₂ имеет наибольшие показатели объемного и массового содержания водорода, но энергозатраты на его получение велики, и некоторые исследователи считают, что данный метод больше подходит для очистки водорода от примесей, а не как глобальная система хранения.

Газобаллонный способ CGH₂ намного дешевле и проще в эксплуатации. Загрузка водорода осуществляется физическим нагнетанием в устройство или материал хранения посредством высоких давлений, а выделение водорода происходит практически автоматически при снятии приложенного давления. Вместе с тем плотность хранимого CGH₂ низка даже при использовании композитных баллонов, рассчитанных на большое давление, с ростом давления увеличивается взрывоопасность. Также следует отметить, что здесь не решается проблема чистоты хранимого водорода.

Способы хранения в гидридах металлов, а также в адсорбционных материалах и их модификациях находятся в стадии разработки.

Большой интерес вызывает концепция LOHC, сочетающая высокую емкость (> 7 %_{мас.}), способную к каталитическим реакциям (де)гидрирования с выделением водорода без примесей CO_x даже при заправке водородом не самого высокого качества. В отличие от физических и физико-химических способов, плотность водорода (от 0,07 кг/л) в LOHC не зависит от воздействия извне и определяется природой и строением вещества. Многие исследования продемонстрировали, что LOHC могут быть одним из наилучших

возможных вариантов хранения водорода в больших объемах по сравнению с LH_2 , CGH_2 , метанолом и аммиаком. Тем не менее, отсутствие реального опыта ограничивает применение ЛОНС.

Как и в случае с ЛОНС, аммиак и метанол могут быть привлекательными вариантами в качестве носителей водорода, поскольку они совместимы с существующей инфраструктурой жидкого топлива. Однако их синтез и разложение являются энергозатратными и капиталоемкими по сравнению с ЛОНС.

В качестве примера в исследовании представлены значения капитальных затрат на системы производства и последующего хранения водорода различных типов (LH_2 , CGH_2 , ЛОНС, NH_3 , CH_3OH), объем которых был равен или эквивалентен 500 т водорода в день. Анализ основных компонентов этих систем показал, что капитальные затраты на хранение жидкого водорода более чем в два раза превышают затраты на хранение водорода в сжатом виде и в четыре раза — на хранение в виде ЛОНС. Энергоэффективность транспортировки ЛОНС без рециркуляции тепла составляет около 60–70 %, что сопоставимо с транспортировкой LH_2 [8]. Электрическая мощность, необходимая для хранения 500 т водорода в сутки, составляет 100, 150 и 0,35 МВт для аммиака, метанола и ЛОНС (DBT) соответственно. Капитальные затраты на основные компоненты для метанольного подхода примерно в два раза выше, чем для аммиака и ЛОНС, главным образом из-за дорогостоящего оборудования для улавливания CO_2 из атмосферы.

По совокупности опасностей LH_2 представляет собой наиболее тяжелое с точки зрения организации процесса хранения, перегрузки и транспортировки вещество [2]. По этой причине, а также в связи с наибольшей плотностью хранения LH_2 , целесообразно в дальнейших исследованиях рассмотреть нормативную базу проектирования емкостей для его хранения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Gahleitner G. Hydrogen from renewable electricity: an international review of power-to-gas pilot plants for stationary applications / G. Gahleitner // *International Journal of Hydrogen Energy*. — 2013. — Vol. 38. — P. 2039–2061.
- Реуцкий А.С. Определение критериев целесообразности создания климатических проектов на водном транспорте / А.С. Реуцкий, Д.С. Семионичев, А.А. Михеева // *Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства*. — 2025. — № 78. — С. 16–22. — EDN ZURMGR.
- Реуцкий А.С. Определение основных путей реализации климатических проектов на водном транспорте / А.С. Реуцкий, Д.С. Семионичев, А.А. Михеева // *Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства*. — 2024. — № 75. — С. 4–15. — EDN FJOQTC.
- Реуцкий А.С. Анализ положений руководящих принципов ИМО по оценке интенсивности выбросов парниковых газов на протяжении жизненного цикла для всех видов судового топлива / А.С. Реуцкий, В.К. Шурпак, С.А. Толмачев // *Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства*. — 2025. — № 79. — С. 14–25. — EDN FBVBVJ.
- Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2018664683. Программа для термодинамического моделирования испарения газа в топливных танках судов и танк-контейнерах: заявл. 24.10.2018, опублик. 20.11.2018, БИ № 11 / А.Г. Топаж, А.С. Реуцкий, О.В. Таровик; правообладатель ФГУП «Крыловский государственный научный центр». — EDN HSYBEA.
- Патент на изобретение № 2649725. Емкость для хранения сжиженного газа: заявл. 28.12.2016, опублик. 04.04.2018, БИ № 10 / А.С. Реуцкий; патентообладатель Российская Федерация, от имени которой выступает Министерство промышленности и торговли Российской Федерации. — 9 с. — EDN SGHVT.
- Singh K. Optimizing liquid hydrogen transport and trade through a hub-and-spoke model / K. Singh, S. Viswanathan. — 2025. — DOI 10.21203/rs.3.rs-6694850/v1.
- Реуцкий А.С. Анализ свойств, характеристик и особенностей водорода в газовой и жидкой фазах для обеспечения безопасной морской транспортировки / А.С. Реуцкий // *Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства*. — 2026. — Т. 56, № 1. — С. 61–76. — EDN KCVCWR.
- Реуцкий А.С. Сравнительный анализ способов транспортировки водорода морским транспортом по критерию удельной грузоподъемности // А.С. Реуцкий, А.С. Буянов, А.А. Буцанец // *Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова*. — 2024. — Т. 16, № 5. — С. 709–725.
- Moradi R. Hydrogen storage and delivery: review of the state of the art technologies and risk and reliability analysis / R. Moradi, K.M. Groth // *International Journal of Hydrogen Energy*. — 2019. — Vol. 44. — P. 12254–12269.
- Elberry A.M. Large-scale compressed hydrogen storage as part of renewable electricity storage systems / A.M. Elberry, J. Thakur, A. Santasalo-Aarnio, M. Larmi // *International Journal of Hydrogen Energy*. — 2011. — Vol. 46. — P. 15671–15690.
- Скворцов А.А. Подземное хранение водорода [презентация] / А.А. Скворцов, А.Н. Панкратенко; ООО «Газпром геотехнологии». — [Электронный ресурс] URL: https://fgosvo.ru/uploadfiles/presentations/Pankratenko_Skvortsov.pdf (дата обращения 02.02.2024).
- Tengborg P. Storage of highly compressed gases in underground Lined Rock Caverns — More than 10 years of experience / P. Tengborg, J. Johansson, J. Durup // *Proceedings of the World Tunnel Congress 2014 — Tunnels for a Better Life (Foz do Iguaçu)*. — 2014. — P. 1–7.
- Group plans underground gas storage facility in Nigeria // *Sweetcrude Reports*. — [Электронный ресурс] URL: <https://sweetcrudereports.com/group-plans-underground-gas-storage-facility-in-nigeria/> (дата обращения 16.06.2025).
- Andersson J. Large-scale storage of hydrogen / J. Andersson, S. Gronkvist // *International Journal of Hydrogen Energy*. — 2019. — Vol. 44. — P. 11901–11919.
- Реуцкий А.С. Назначение размеров охраняемой зоны в ходе выполнения бункеровки СПГ методом «автоцистерна — судно» / А.С. Реуцкий, В.А. Павловский // *Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства*. — 2025. — № 78. — С. 4–15. — EDN YZMAKE.

17. Чабак А.Ф. Проблемы хранения и использования водорода / А.Ф. Чабак, А.И. Ульянов // Вестник машиностроения. — 2007. — Т. 4. — С. 48–52.
18. Тарасов Б.П. Методы хранения водорода и возможности использования металлогидридов / Б.П. Тарасов, В.В. Бурнашева, М.В. Лотоцкий, В.А. Ярытыс // Альтернативная энергетика и экология. — 2005. — Т. 12. — С. 14–37. — EDN ZDJQFT.
19. Циклис Д.С. Техника физико-химических исследований при высоких и сверхвысоких давлениях / Д.С. Циклис. — М.: Химия, 1976. — 432 с.
20. Zuttel A. Materials for hydrogen storage / A. Zuttel // Materials Today. — 2003. — Vol. 9. — P. 24–33.
21. Wolf J. Liquid-hydrogen technology for vehicles / J. Wolf // MRS Bulletin. — 2002. — Vol. 9. — P. 684–687.
22. Ren J. Current research trends and perspectives on materials-based hydrogen storage solutions: A critical review / J. Ren, N.M. Musyoka, H.W. Langmi, M. Mathe, S. Liao // International Journal of Hydrogen Energy. — 2017. — Vol. 42. — P. 289–311.
23. 210L-35MPa Hydrogen vehicle carried type III hydrogen storage tank // Made-in-China.com. — [Электронный ресурс] URL: https://ru.made-in-china.com/co_hfsinopower/product_210L-35MPa-Hydrogen-Vehicle-Carried-Type-III-Hydrogen-Storage-Tank_yuunisgnng.html (дата обращения 16.06.2025).
24. Жеваго Н.К. Микрокапиллярные емкости для хранения водорода / Н.К. Жеваго, В.И. Глебов, Э.И. Денисов, С.В. Коробцев, А.Ф. Чабак // Альтернативная энергия и экология. — 2012. — Т. 9. — С. 106–115. — EDN PDBTCJ.
25. Fuel Cell Technologies Office — Multi-Year Research, Development and Demonstration Plan: 3.2 Hydrogen Delivery / U.S. Department of Energy. — 2015. — [Электронный ресурс] URL: https://www.energy.gov/sites/prod/files/2015/08/f25/cto_myrd_delivery.pdf (дата обращения 19.06.2026).
26. Shelby J. Glass microspheres for hydrogen storage / J. Shelby // DOE Hydrogen Program. FY 2008 Annual Progress Report. — 2008. — P. 721–724. — [Электронный ресурс] URL: https://www.hydrogen.energy.gov/docs/hydrogenprogramlibraries/pdfs/progress08/iv_d_5_shelby.pdf?sfvrsn=24e7f7bb_1 (дата обращения 19.06.2026).
27. Raine D. High pressure tube trailers driving hydrogen transport forward / D. Raine // gasworld. — [Электронный ресурс] URL: <https://www.gasworld.com/story/high-pressure-tube-trailers-driving-hydrogen-transport-forward/> (дата обращения 16.06.2025).
28. Cardella U. Process optimization for large-scale hydrogen liquefaction / U. Cardella, L. Decker, J. Sundberg, H. Klein // International Journal of Hydrogen Energy. — 2017. — Vol. 42. — P. 12339–12354.
29. Verfondern K. Handbook of hydrogen safety: Chapter on LH2 safety / K. Verfondern, D. Cirrone, V. Molkov, D. Makarov et al. — 2021. — (Pre-normative research for safe use of liquid hydrogen (PRESLHY): Project deliverable D 6.1.)
30. The Suiso Frontier // Hydrogen Energy Supply Chain (HESC). — [Электронный ресурс] URL: <https://www.hydrogenenergysupplychain.com/about-the-pilot/supply-chain/the-suiso-frontier/> (дата обращения 16.06.2025).
31. Mei R.W. Chill down processes of hydrogen transport pipelines. Report NASA/CR-2006-214091 / R.W. Mei, J. Klausner // NASA Hydrogen Research for Spaceport and Space Based Applications. — July 1, 2006. — P. 85–103.
32. Irani R.S. Hydrogen storage: High-pressure gas containment / R.S. Irani // MRS Bulletin. — 2002. — Vol. 9. — P. 680–682.
33. Stroman R.O. Liquid hydrogen fuel system design and demonstration in a small long endurance air vehicle / R.O. Stroman, M.W. Schuette, K. Swider-Lyons, J.A. Rodgers, D.J. Edwards // International Journal of Hydrogen Energy. — 2014. — Vol. 39(21). — P. 11279–11290.
34. Van den Berg A.W.C. Materials for hydrogen storage: current research trends and perspectives / A.W.C. Van den Berg, C.O. Arean // Chemical Communications. — 2008. — Vol. 6. — P. 668–681.
35. Langmi H.W. Hydrogen storage in metal-organic frameworks: A review / H.W. Langmi, J. Ren, B. North, M. Mathe, D. Bessarabov // Electrochimica Acta. — 2014. — Vol. 128. — P. 368–392.
36. Abdin Z. Single and polystorage technologies for renewable-based hybrid energy systems / Z. Abdin, K.R. Khalilpour // Polygeneration with Polystorage: For Chemical and Energy Hubs / K.R. Khalilpour (ed.). — Academic Press, 2019. — P. 77–131.
37. Abdin Z. Component models for solar hydrogen hybrid energy systems based on metal hydride energy storage: PhD thesis / Z. Abdin; Griffith University. — 2017. — 213 p.
38. Abdin Z. Solar hydrogen hybrid energy systems for off-grid electricity supply: A critical review / Z. Abdin, C. Webb, E. Gray // Renewable and Sustainable Energy Reviews. — 2015. — Vol. 52. — P. 1791–1808.
39. Rusman N. A review on the current progress of metal hydrides material for solid-state hydrogen storage applications / N. Rusman, M. Dahari // International Journal of Hydrogen Energy. — 2016. — Vol. 41. — P. 12108–12126.
40. Ахметов Н.С. Общая и неорганическая химия / Н.С. Ахметов. — М.: ВШ, 2001. — 743 с.
41. Bruckner N. Evaluation of industrially applied heat-transfer fluids as liquid organic hydrogen carrier systems / N. Bruckner, K. Obesser, A. Bosmann, A. Bosmann et al. // ChemSusChem. — 2014. — Vol. 7. — P. 229–235.
42. Shi L. Integration of hydrogenation and dehydrogenation based on dibenzyltoluene as liquid organic hydrogen energy carrier / L. Shi, S. Qi, J. Qu, T. Che et al. // International Journal of Hydrogen Energy. — 2019. — Vol. 44. — P. 5345–5354.
43. Kickoff for construction and operation of the world's largest project plant for storing green hydrogen in Liquid Organic Hydrogen Carrier in Germany/Dormagen // Hydrogenious LOHC. — March 3, 2021. — [Электронный ресурс] URL: <https://hydrogenious.net/kick-off-for-construction-and-operation-of-the-worlds-largest-plant-for-storing-green-hydrogen-in-liquid-organic-hydrogen-carrier/> (дата обращения 19.06.2026).
44. Abdin Z. Large-scale stationary hydrogen storage via liquid organic hydrogen carriers / Z. Abdin, Ch. Tang, Y. Liu, K. Catchpole // iScience 24. — September 24, 2021. — P. 102966.
45. Gardiner M. Energy requirements for hydrogen gas compression and liquefaction as related to vehicle storage needs / M. Gardiner. — 2009. — 6 p. (DOE Hydrogen and Fuel Cells Program Record 9013.) — [Электронный ресурс] URL: https://www.hydrogen.energy.gov/pdfs/9013_energy_requirements_for_hydrogen_gas_compression.pdf.
46. Eypasch M. Model-based techno-economic evaluation of an electricity storage system based on Liquid Organic Hydrogen Carriers / M. Eypasch, M. Schimpe, A. Kanwar, T. Hartmann et al. // Applied Energy. — 2017. Vol. 185. — P. 320–330.
47. Morgan E.R. Techno-economic feasibility study of ammonia plants powered by offshore wind: PhD thesis / E.R. Morgan; University of Massachusetts. — 2013. — 402 p.
48. Van-Dal E.S. Design and simulation of a methanol production plant from CO₂ hydrogenation / E.S. Van-Dal, C. Bouallou // Journal of Cleaner Production. — 2013. — Vol. 57. — P. 38–45.
49. Fasihi M. Techno-economic assessment of CO₂ direct air capture plants / M. Fasihi, O. Efimova, C. Breyer // Journal of Cleaner Production. — 2019. — Vol. 224. — P. 957–980.
50. Wang Y. Storage system of renewable energy generated hydrogen for chemical industry / Y. Wang, J. Kowal, M. Leuthold, D.U. Sauer // Energy Procedia. — 2012. — Vol. 29. — P. 657–667.
51. Hurskainen M. Liquid organic hydrogen carriers (LOHC): Concept evaluation and techno-economics / M. Hurskainen. — VTT Technical Research Centre of Finland. VTT Research Report No. VTT-R-00057-19. — 02.12.2019.

52. Reuß M. Seasonal storage and alternative carriers: a flexible hydrogen supply chain model / M. Reuß, T. Grube, M. Robinius, P. Preuster et al. // *Applied Energy*. — 2017. — Vol. 200. — P. 290–302.
53. Keith D.W. A process for capturing CO₂ from the atmosphere / D.W. Keith, G. Holmes, D.S. Angelo, K. Heidel // *Joule*. — 2018. — Vol. 2(10). — P. 1573–1594.
54. Razi F. Challenges, opportunities and future directions in hydrogen sector development in Canada / F. Razi, I. Dincer // *International Journal of Hydrogen Energy*. — 2022. — Vol. 47. — P. 9083–9102.
55. Xie Z. A review of hydrogen storage and transportation: Progresses and challenges / Z. Xie, Q. Jin, G. Su, W. Lu // *Energies*. — 2024. — Vol. 17. — P. 4070. DOI 10.3390/en17164070.
56. Wang F. Shipping Australian sunshine: Liquid renewable green fuel export / F. Wang, R. Swinbourn, C. Li // *International Journal of Hydrogen Energy*. — 2023. — Vol. 48. — P. 14763–14784.
57. Bai F. A techno-economic analysis of cross-regional renewable hydrogen supply routes in China / F. Bai, F. Zhao, X. Liu, Z. Mu // *International Journal of Hydrogen Energy*. — 2023. — Vol. 48. — P. 37031–37044.
58. Liu B. Economic study of a large-scale renewable hydrogen application utilizing surplus renewable energy and natural gas pipeline transportation in China / B. Liu, S. Liu, S. Guo, S. Zhang // *International Journal of Hydrogen Energy*. — 2020. — Vol. 45. — P. 1385–1398.

REFERENCES

1. Gahleitner G. Hydrogen from renewable electricity: an international review of power-to-gas pilot plants for stationary applications. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2013. Vol. 38. P. 2039–2061.
2. Reutskii A.S., Semionichev D.S., Mikheeva A.A. Determining reasonability criteria for climate projects in water transport. *Research Bulletin by Russian Maritime Register of Shipping*. 2025. No. 78. P. 16–22. EDN ZURMGR. (In Russ.)
3. Reutskii A.S., Semionichev D.S., Mikheeva A.A. Identification of the main ways to implement climate projects in waterborne transport. *Research Bulletin by Russian Maritime Register of Shipping*. 2024. No. 75. P. 4–15. EDN FJOQTC. (In Russ.)
4. Reutskii A.S., Shurpyak V.K., Tolmachev S.A. Analysis of the IMO guidelines for estimating the intensity of greenhouse gas emissions over the life cycle for all types of marine fuels. *Research Bulletin by Russian Maritime Register of Shipping*. 2025. No. 79. P. 14–25. EDN FBBBJV. (In Russ.)
5. Svidetel'stvo o gosudarstvennoi registratsii programmy dlya EVM № 2018664683. Programma dlya termodinamicheskogo modelirovaniya ispareniiyaza v toplivnykh tankakh sudov i tank-konteinerakh [Certificate of state registration of the computer program, No. 2018664683. Program for thermodynamic determination of gas evaporation in fuel tanks of ships and tank containers]: appl. 24.10.2018, publ. on 20.11.2018, bul. No. 11 / A.G. Topazh, A.S. Reutskii, O.V. Tarovik; patentee Krylov State Research Centre. EDN HSYBEA.
6. Patent for invention No. 2649725. Emkost' dlya khraneniya szhizhennogo gaza [Liquefied gas storage tank]: appl. 28.12.2016, publ. on 04.04.2018, bul. No. 10 / A.S. Reutskii; patentee Russian Federation, on behalf of which the Ministry of Industry and Trade of the Russian Federation acts. 9 p. EDN SGHVT.
7. Singh K., Viswanathan S. Optimizing liquid hydrogen transport and trade through a hub-and-spoke model. 2025. DOI 10.21203/rs.3.rs-6694850/v1.
8. Reutskii A.S. Analysis of properties, characteristics and features of hydrogen in gas and liquid phases to ensure safe sea transportation. *Research Bulletin by Russian Maritime Register of Shipping*. 2026. T. 56, No. 1. P. 61–76. EDN KCVCWR. (In Russ.)
9. Reutskii A.S., Buyanov A.S., Butsanets A.A. Comparative analysis of methods of hydrogen transportation by sea transport based on the criterion of specific loading capacity. *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova*. 2024. Vol. 16, No. 5. P. 709–725. (In Russ.)
10. 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. P. 12254–12269.
11. Elberry A.M., Thakur J., Santasalo-Aarnio A., Larmi M. Large-scale compressed hydrogen storage as part of renewable electricity storage systems. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2011. Vol. 46. P. 15671–15690.
12. Skvortsov A.A., Pankratenko A.N. Podzemnoe khranenie vodoroda [Underground hydrogen storage: presentation] / OOO Gazprom geotekhnologii. URL: https://fgosvo.ru/uploadfiles/presentations/Pankratenko_Skvortsov.pdf (accessed 02.02.2024).
13. Tengborg P., Johansson J., Durup J. Storage of highly compressed gases in underground Lined Rock Caverns — More than 10 years of experience. *Proceedings of the World Tunnel Congress 2014 — Tunnels for a Better Life (Foz do Iguaçu)*. 2014. P. 1–7.
14. Group plans underground gas storage facility in Nigeria. *Sweetcrude Reports*. URL: <https://sweetcrudereports.com/group-plans-underground-gas-storage-facility-in-nigeria/> (accessed 16.06.2025).
15. Andersson J., Gronkvist S. Large-scale storage of hydrogen. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2019. Vol. 44. P. 11901–11919.
16. Reutskii A.S., Pavlovsky V.A. Assigning the size of the protected area during the TTS LNG bunkering operation. *Research Bulletin by Russian Maritime Register of Shipping*. 2025. No. 78. P. 4–15. EDN YZMAKE. (In Russ.)
17. Chabak A.F., Ulyanov A.I. Hydrogen keeping and utilization objectives. *Vestnik Mashinostroeniya [Bulletin of Mechanical Engineering]*. 2007. Vol. 4. P. 48–52. (In Russ.)
18. Tarasov B.P., Burnasheva V.V., Lototsky M.V., Yartys' V.A. Methods for hydrogen storage and feasibility to use metalhydrides. *Alternative Energy and Ecology*. 2005. Vol. 12. P. 14–37. EDN ZDJQFT. (In Russ.)
19. Tsiklis D.S. Tekhnika fiziko-khimicheskikh issledovaniy pri vysokikh i sverkhvysokikh davleniyakh [Techniques for physical and chemical research at high and ultrahigh pressures]. Moscow: Khimiya, 1976. 432 p.
20. Zuttel A. Materials for hydrogen storage. *Materials Today*. 2003. Vol. 9. P. 24–33.
21. Wolf J. Liquid-hydrogen technology for vehicles. *MRS Bulletin*. 2002. Vol. 9. P. 684–687.
22. Ren J., Musyoka N.M., Langmi H.W., Mathe M., Liao S. Current research trends and perspectives on materials-based hydrogen storage solutions: A critical review. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2017. Vol. 42. P. 289–311.
23. 210L-35MPa Hydrogen vehicle carried type III hydrogen storage tank. *Made-in-China.com*. URL: https://ru.made-in-china.com/co_hfsinopower/product_210L-35MPa-Hydrogen-Vehicle-Carried-Type-III-Hydrogen-Storage-Tank_yuunisgnng.html (accessed 16.06.2025).
24. Zhevago N.K., Glebov V.I., Denisov E.I., Koroptsev S.V., Chabak A.F. Micro-capillary vessels for hydrogen storage. *Alternative Energy and Ecology*. 2012. Vol. 9. P. 106–115. EDN PDBTCJ.

25. Fuel Cell Technologies Office — Multi-Year Research, Development and Demonstration Plan: 3.2 Hydrogen Delivery / U.S. Department of Energy. 2015. URL: https://www.energy.gov/sites/prod/files/2015/08/f25/fcto_myRDD_delivery.pdf (accessed 19.06.2026).
26. Shelby J. Glass microspheres for hydrogen storage. *DOE Hydrogen Program. FY 2008 Annual Progress Report*. 2008. P. 721–724. URL: https://www.hydrogen.energy.gov/docs/hydrogenprogramlibraries/pdfs/progress08/iv_d_5_shelby.pdf?sfvrsn=24c7f7bb_1 (accessed 19.06.2026).
27. Raine D. High pressure tube trailers driving hydrogen transport forward. *gasworld*. URL: <https://www.gasworld.com/story/high-pressure-tube-trailers-driving-hydrogen-transport-forward/> (accessed 16.06.2025).
28. Cardella U., Decker L., Sundberg J., Klein H. Process optimization for large-scale hydrogen liquefaction. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2017. Vol. 42. P. 12339–12354.
29. Verfondern K., Cirrone D., Molkov V., Makarov D. et al. Handbook of hydrogen safety: Chapter on LH2 safety. 2021. (Pre-normative research for safe use of liquid hydrogen (PRESLHY): Project deliverable D 6.1.)
30. The Suiso Frontier. *Hydrogen Energy Supply Chain (HESC)*. URL: <https://www.hydrogenenergysupplychain.com/about-the-pilot/supply-chain/the-suiso-frontier/> (accessed 16.06.2025).
31. Mei R.W., Klausner J. Chill down processes of hydrogen transport pipelines. Report NASA/CR-2006-214091. *NASA Hydrogen Research for Spaceport and Space Based Applications*. July 1, 2006. P. 85–103.
32. Irani R.S. Hydrogen storage: High-pressure gas containment. *MRS Bulletin*. 2002. Vol. 9. P. 680–682.
33. Stroman R.O., Schuette M.W., Swider-Lyons K., Rodgers J.A., Edwards D.J. Liquid hydrogen fuel system design and demonstration in a small long endurance air vehicle. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2014. Vol. 39(21). P. 11279–11290.
34. Van den Berg A.W.C., Arean C.O. Materials for hydrogen storage: current research trends and perspectives. *Chemical Communications*. 2008. Vol. 6. P. 668–681.
35. Langmi H.W., Ren J., North B., Mathe M., Bessarabov D. Hydrogen storage in metal-organic frameworks: A review. *Electrochimica Acta*. 2014. Vol. 128. P. 368–392.
36. Abdin Z., Khalilpour K.R. Single and polystorage technologies for renewable-based hybrid energy systems. *Polygeneration with Polystorage: For Chemical and Energy Hubs* / K.R. Khalilpour (ed.). Academic Press, 2019. P. 77–131.
37. Abdin Z. Component models for solar hydrogen hybrid energy systems based on metal hydride energy storage: PhD thesis / Griffith University. 2017. 213 p.
38. Abdin Z., Webb C., Gray E. Solar hydrogen hybrid energy systems for off-grid electricity supply: A critical review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2015. Vol. 52. P. 1791–1808.
39. Rusman N., Dahari M. A review on the current progress of metal hydrides material for solid-state hydrogen storage applications. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2016. Vol. 41. P. 12108–12126.
40. Akhmetov N.S. *Obshchaya i neorganicheskaya khimiya* [General and inorganic chemistry]. Moscow: Vysshaya shkola, 2001. 743 p.
41. Bruckner N., Obesser K., Bosmann A., Bosmann A. et al. Evaluation of industrially applied heat-transfer fluids as liquid organic hydrogen carrier systems. *ChemSusChem*. 2014. Vol. 7. P. 229–235.
42. Shi L., Qi S., Qu J., Che T. et al. Integration of hydrogenation and dehydrogenation based on dibenzyltoluene as liquid organic hydrogen energy carrier. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2019. Vol. 44. P. 5345–5354.
43. Kickoff for construction and operation of the world's largest project plant for storing green hydrogen in Liquid Organic Hydrogen Carrier in Germany/Dormagen. *Hydrogenious LOHC*. March 3, 2021. URL: <https://hydrogenious.net/kick-off-for-construction-and-operation-of-the-worlds-largest-plant-for-storing-green-hydrogen-in-liquid-organic-hydrogen-carrier/> (accessed 19.06.2026).
44. Abdin Z., Tang Ch., Liu Y., Catchpole K. Large-scale stationary hydrogen storage via liquid organic hydrogen carriers. *iScience* 24. September 24, 2021. P. 102966.
45. Gardiner M. Energy requirements for hydrogen gas compression and liquefaction as related to vehicle storage needs. 2009. 6 p. (DOE Hydrogen and Fuel Cells Program Record 9013.) URL: https://www.hydrogen.energy.gov/pdfs/9013_energy_requirements_for_hydrogen_gas_compression.pdf.
46. Eypasch M., Schimpe M., Kanwar A., Hartmann T. et al. Model-based techno-economic evaluation of an electricity storage system based on Liquid Organic Hydrogen Carriers. *Applied Energy*. 2017. Vol. 185. P. 320–330.
47. Morgan E.R. Techno-economic feasibility study of ammonia plants powered by offshore wind: PhD thesis / University of Massachusetts. 2013. 402 p.
48. Van-Dal E.S., Bouallou C. Design and simulation of a methanol production plant from CO₂ hydrogenation. *Journal of Cleaner Production*. 2013. Vol. 57. P. 38–45.
49. Fasihi M., Efimova O., Breyer C. Techno-economic assessment of CO₂ direct air capture plants. *Journal of Cleaner Production*. 2019. Vol. 224. P. 957–980.
50. Wang Y., Kowal J., Leuthold M., Sauer D.U. Storage system of renewable energy generated hydrogen for chemical industry. *Energy Procedia*. 2012. Vol. 29. P. 657–667.
51. Hurskainen M. Liquid organic hydrogen carriers (LOHC): Concept evaluation and techno-economics / VTT Technical Research Centre of Finland. VTT Research Report No. VTT-R-00057-19. 02.12.2019.
52. Reuß M., Grube T., Robinius M., Preuster P. et al. Seasonal storage and alternative carriers: a flexible hydrogen supply chain model. *Applied Energy*. 2017. Vol. 200. P. 290–302.
53. Keith D.W., Holmes G., Angelo D.S., Heidel K. A process for capturing CO₂ from the atmosphere. *Joule*. 2018. Vol. 2(10). P. 1573–1594.
54. Razi F., Dincer I. Challenges, opportunities and future directions in hydrogen sector development in Canada. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2022. Vol. 47. P. 9083–9102.
55. Xie Z., Jin Q., Su G., Lu W. A review of hydrogen storage and transportation: Progresses and challenges. *Energies*. 2024. Vol. 17. P. 4070. DOI 10.3390/en17164070.
56. Wang F., Swinbourn R., Li C. Shipping Australian sunshine: Liquid renewable green fuel export. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2023. Vol. 48. P. 14763–14784.
57. Bai F., Zhao F., Liu X., Mu Z. A techno-economic analysis of cross-regional renewable hydrogen supply routes in China. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2023. Vol. 48. P. 37031–37044.
58. Liu B., Liu S., Guo S., Zhang S. Economic study of a large-scale renewable hydrogen application utilizing surplus renewable energy and natural gas pipeline transportation in China. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2020. Vol. 45. P. 1385–1398.

Статья поступила в редакцию 10.04.2026.

Принята к публикации 15.05.2026.