

DOI: 10.21821/2309-5180-2024-16-5-709-725

COMPARATIVE ANALYSIS OF METHODS OF HYDROGEN TRANSPORTATION BY SEA TRANSPORT BASED ON THE CRITERION OF SPECIFIC LOADING CAPACITY

A. S. Reutskii¹, A. S. Buyanov², A. A. Butsanets³

¹ FAI «Russian Maritime Register of Shipping», St. Petersburg, Russian Federation

² JSC «CNIIMF», St. Petersburg, Russian Federation

³ Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping,
St. Petersburg, Russian Federation

The paper examines vessel designs and existing vessels for the transportation of hydrogen in its various aggregate states and chemically bound forms. The aim of the study is to determine the optimal method of transporting hydrogen by sea in terms of specific carrying capacity. The objective of the study was to establish the relationship between the size of the transported commercial batch of hydrogen (taking into account its form) and the technical and operational characteristics of the vessel for its transportation in relation to each of the possible methods of storing hydrogen on board. The approach used made it possible to determine the optimal options in terms of specific carrying capacity for the marine transportation of hydrogen on ships with a displacement of 25...80 thousand tons. It was determined that LPG gas carriers and chemical tankers for transporting ammonia and methanol, respectively, are optimal in terms of specific carrying capacity in the displacement range under consideration. Conceptual designs of vessels for transporting hydrogen in "pure" form (compressed or liquefied) have shown insignificant results. An intermediate position is occupied by the method of transporting hydrogen using liquid organic carriers.

Keywords: hydrogen, marine hydrogen transportation, compressed hydrogen, CGH_2 , liquid hydrogen, LH_2 , liquid organic hydrogen carriers, LOHC, dibenzyltoluene, DBT, ammonia NH_3 , methanol, CH_3OH .

For citation:

Reutskii Aleksandr S., Buyanov Aleksandr S., Butsanets Artem 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* 16.5 (2024): 709–725.
DOI: 10.21821/2309-5180-2024-16-5-709-725.

УДК 65.66

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ СПОСОБОВ ТРАНСПОРТИРОВКИ ВОДОРОДА МОРСКИМ ТРАНСПОРТОМ ПО КРИТЕРИЮ УДЕЛЬНОЙ ГРУЗОПОДЪЕМНОСТИ

А. С. Реуцкий¹, А. С. Буянов², А. А. Буцанец³

¹ ФАУ «Российский морской регистр судоходства»,
Санкт-Петербург, Российская Федерация

² АО «ЦНИИМФ», Санкт-Петербург, Российская Федерация

³ ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова»,
Санкт-Петербург, Российская Федерация

В работе рассмотрены проекты судов и существующие суда для перевозки водорода в различных его агрегатных состояниях и химически связанном виде. Целью исследования является определение оптимального с точки зрения удельной грузоподъемности способа транспортировки водорода морским транспортом. Задачей исследования является установление зависимости между размером перевозимой товарной партии водорода (с учетом его состояния) и технико-эксплуатационными характеристиками судна для его транспортировки применительно к каждому из возможных способов его хранения на борту. Обобщены и проанализированы материалы исследований отечественных и зарубежных ученых, а также профильных руководящих документов. Определены типоразмерные ряды транспортных судов для транспортировки водорода в разных агрегатных состояниях (сжатом, сжиженном) и в химически

связанных видах (в виде аммиака, метанола, жидких органических носителей), содержащие информацию об их эксплуатационных характеристиках: чистой грузоподъемности, грузовместимости, главных размерениях и т. д. Определены оптимальные с точки зрения удельной провозной способности транспортной линии способы морской транспортировки водорода. Использованный подход позволил определить оптимальные с точки зрения удельной провозной способности варианты морской транспортировки водорода на судах водоизмещением 25...80 тыс. т. Определено, что оптимальными с точки зрения удельной грузоподъемности в рассматриваемом диапазоне водоизмещения являются газовозы LPG и танкеры-химовозы для транспортировки аммиака и метанола соответственно. Концептуальные проекты судов для транспортировки водорода в «чистом» виде (сжатом или сжиженном) показали самые скромные результаты. Промежуточное положение занимает способ транспортировки водорода при помощи жидких органических носителей.

Ключевые слова: водород, морская транспортировка водорода, сжатый водород, сжиженный водород, жидкие органические носители водорода, дибензилтолуол, аммиак, метанол.

Для цитирования:

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. DOI: 10.21821/2309-5180-2024-16-5-709-725.

Введение (Introduction)

Стратегия ИМО направлена на сокращение выбросов парниковых газов энергетическими установками морских судов к 2050 г. в два раза. В этой связи активно обсуждаются вопросы снижения выбросов парниковых газов судовыми энергетическими установками [1], [2], использования альтернативных видов судового топлива [3], использования «зеленого» водорода в качестве топлива, а также рассматриваются технологические цепочки его производства и поставки [4]. Места производства «зеленого» водорода зачастую удалены от мест его потребления [5], что в перспективе создаст потребность в судах для его транспортировки. Несмотря на наличие публикаций на тему использования водорода в качестве топлива на морском транспорте [6] вопросы создания судов для его транспортировки, а также выбора оптимального способа его транспортировки водным транспортом остаются малоизученными.

При организации цепочки поставки водорода, включающей его транспортировку и хранение, может потребоваться неоднократное изменение его агрегатного состояния, в частности для увеличения плотности, продления срока хранения водорода или по иным причинам, продиктованным способом его производства или применения, транспортировки, партионности доставки и т. д. Водород не является исключением [7] и может транспортироваться и храниться в сжатом (*compressed gaseous hydrogen* — CGH₂), сжиженном (*liquid hydrogen* — LH₂) и химически связанном виде: в виде жидких органических носителей водорода [8] (*Liquid Organic Hydrogen Carriers* — LOHC), а также в виде аммиака (NH₃) и метанола (CH₃OH). При этом водород в различных агрегатных состояниях или связанных видах имеет разные характеристики и требует применения различных технических решений для безопасного и эффективного обращения с ним, что оказывает влияние на облик судна для его транспортировки.

При организации цепочки поставок продукта или сырья наиболее важную роль играет себестоимость транспортировки [9]. В отсутствии широкого распространения водорода как топлива оценить эту величину можно только при помощи расчетных технико-экономических моделей. Для принятия решения о способе транспортировки водорода в рамках таких моделей необходимо иметь представление об облике транспортных судов, перевозящих водород в различных агрегатных состояниях или связанных видах. Для адекватного сравнения различных типов судов-водородовозов можно обратиться к величине их удельной грузоподъемности по водоизмещению, представляющей собой отношение массы перевозимого ими груза к их водоизмещению. Использование этой величины позволит выполнить сравнительный анализ провозной способности вариантов морской транспортировки водорода, что до сих пор остается малоизученной проблемой. Таким образом, целью исследования является определение оптимального с точки зрения удельной грузоподъемности способа транспортировки водорода морским транспортом.

История транспортировки аммиака и метанола водным транспортом насчитывает уже не одно десятилетие [3]. Перевозка водорода в сжиженном виде (LH_2) осуществляется на единственном в своем роде судне *Suiso Frontier*, а морская транспортировка водорода в сжатом (CGH_2) и в химически связанном виде $LOHC$ до сих пор не применялись. Для определения облика судов для перевозки водорода в виде аммиака и метанола достаточно обратиться к статистическим данным по уже существующим судам, а в случае сжиженного и сжатого водорода — к опыту концептуальных проектов, созданных в последние годы. Как показало ретроспективное исследование существующих и проектируемых судов для транспортировки водорода, использование статистической информации о них не дает возможности выполнить сравнение всех исследуемых технологий и не позволяет установить зависимость между размером товарной партии водорода и технико-эксплуатационными характеристиками судна для его перевозки. Таким образом, для части агрегатных состояний водорода отсутствуют готовые или масштабируемые технические решения для его транспортировки, что обуславливает необходимость определения типоразмерного ряда транспортных судов, предназначенных для транспортировки водорода в различных его агрегатных состояниях и связанных видах, а также определение нижней и верхней границы диапазона водоизмещения всех типов сравниваемых судов для транспортировки водорода и углекислого газа в целях их корректного сравнения.

Исследование состоит из двух частей: анализа спроектированных или построенных судов для транспортировки водорода в разных его агрегатных состояниях и химически связанных видах и сравнения их по критерию удельной грузоподъемности в рамках сопоставимых децвейтных групп.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Морская транспортировка водорода в сжатом виде (CGH_2)

Проекты судов для перевозки водорода в сжатом виде (CGH_2). Одним из способов «уплотнения» водорода является его сжатие. Сжатие водорода в сосуде под давлением в 100 бар позволяет повысить его плотность в 73 раза (с $0,08987 \text{ кг/м}^3$ до $6,59 \text{ кг/м}^3$); под давлением в 200 бар — в 154 раза (до $13,919 \text{ кг/м}^3$); под давлением в 300 бар — в 240 раз (до $21,6 \text{ кг/м}^3$). Мировым опытом подтверждается, что этот способ транспортировки может быть востребован. Так, в 2020 г. австралийская компания *Global Energy Ventures* анонсировала создание первого проекта судна CGH_2 , заключив соглашение с *ABS* на сопровождение процесса проектирования¹. Грузовая система судна H_2 Neo рассчитывается на внутреннее давление 250 бар, грузоподъемность составит 430 т водорода, при этом судно имеет типоразмер *Handymax* (рис. 1, а).

В декабре 2022 г. *ABS* было выдано принципиальное одобрение на этот проект, в настоящий момент идет разработка проектной документации и подготовка к строительству. За выбор судостроительного предприятия отвечает компания *Clarksons PLC* (Великобритания). Пропульсивный комплекс судна, состоящий из двухтопливных двигателей, приводящих в движение электродвигатели с двумя гребными винтами фиксированного шага, разрабатывает компания *Wärtsilä Marine Power*².

Концептуальный подход к определению размерного ряда транспортных судов для перевозки водорода в сжатом виде (CGH_2). Анализ научно-технической литературы показал, что в настоящее время существует лишь один концептуальный проект водородовоза H_2 Neo с напорной грузовой системой для транспортировки водорода в сжатом виде от компании *Provaris Energy*, но его характеристики не раскрываются, поэтому для формирования представления об особенностях судов данного типа необходимо обратиться к опыту проектирования подобных судов для природного газа. Проекты судов *CNG* выполняются с напорными газовыми баллонами, объединенными в каскеты (рис. 1, б). В исследовании [10] рассмотрены три основных типоразмера каскетов для хранения

¹ Design unveiled for world's 1st compressed hydrogen ship // Информационный портал Offshore-energy.biz. URL: <https://www.offshore-energy.biz/design-unveiled-for-worlds-1st-compressed-hydrogen-ship/> (дата обращения: 08.04.2024).

² Wärtsilä's decarbonisation focus emphasised with Approval-in-Principle for GEVs pilot hydrogen vessel // Официальный сайт компании Wärtsilä. URL: <https://www.wartsila.com/media/news/04-11-2021-wartsila-s-decarbonisation-focus-emphasised-with-approval-in-principle-for-gevs-pilot-hydrogen-vessel-3001446> (дата обращения: 08.04.2024).

газов под давлением в судовом исполнении, незначительно отличающихся объемом, линейными размерами и количеством баллонов в кассете, а также некоторыми характеристиками баллонов (толщиной стенки, диаметром трубы и др.).

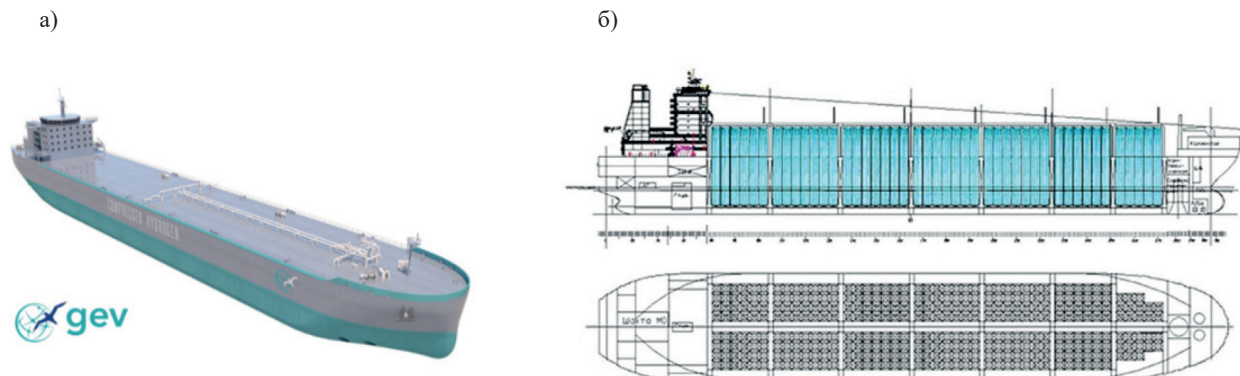


Рис. 1. Концептуальный проект судна CGH_2 проекта H_2Neo (а);
схема размещения цилиндрических грузовых баллонов на CNG -судне
при установке их в вертикальном положении (б)

В табл. 1 приведены габаритные размеры и массовые параметры кассеты и хранящегося в ней при давлении 200 бар водорода. Как видно из приведенных в таблице данных, массовая плотность данного способа хранения, т. е. отношение массы хранимого водорода к массе хранилища, составляет 1,21–2,36 %. При этом совокупный вес системы хранения и груза представляет собой значительную величину. Для того чтобы иметь упрощенное представление о размерениях судов для транспортировки водорода напорным способом в кассетах, необходимо представить массу кассет с водородом как полезную нагрузку для существующего типоряда распространенных транспортных судов. С учетом того, что при данном подходе будет известен вес груза и его условной тары (кассет с баллонами), следует выполнить сравнительный анализ, взяв за основу типоряд нефтяных танкеров, распределенных по дедвейтным группам. Нефтяные танкеры в данном случае наиболее удобны, так как для этих судов известна грузоподъемность, в отличие, например, от газозовозов, для которых обычно указывается объем грузовой системы. Необходимо особо отметить, что данный подход весьма условен и не учитывает вопросы мореходности CGH_2 судов (в первую очередь остойчивости), однако на ранних этапах технико-экономического исследования вопросы более общего плана превалируют над вопросами мореходных качеств, определение которых является предметом дальнейших исследований.

Таблица 1

Характеристики кассеты и хранящегося при давлении 200 бар водорода

Параметр	Тип кассеты		
	1	2	3
Внутренний объем баллона, м ³	28,90	53,26	27,28
Масса пустого баллона, т	31,32	57,36	29,78
Масса водорода в 1 баллоне, т	0,40	0,74	0,38
Количество баллонов в кассете, единиц	8	8	8
Масса кассеты с баллонами, т	270,56	495,5	257,24
Масса газа в кассете с баллонами*, т	3,22	5,93	3,04
Суммарная масса кассеты и газа, т	273,8	501,4	260,3

*Плотность водорода при давлении 200 бар и температуре 293,15 К составляет 13,91 кг/м³.

Величина полезной нагрузки для CGH_2 судов различных дедвейтных групп в зависимости от их типоразмера и давления внутри системы хранения представлена в табл. 2 и на рис. 2. В качестве прототипа кассет для грузовой системы выбран тип 1 — кассеты с наименьшим диаметром баллонов, выдерживающие наибольшее внутреннее давление.

Таблица 2

Главные размерения и массовые характеристики системы хранения водорода CGH_2 судов

Дедвейт*, т	Длина L_{bp} , м	Ширина B , м	Осадка в грузу d , м	Высота борта H , м	Водоизмещение Δ , т	Количество кассет, ед.	Масса грузовой системы с грузом, т	Полезная грузоподъемность по водороду**, т
20 000	154,0	23,0	8,5	12,7	26 000	68	18 618	219
30 000	168,0	29,0	9,5	14,0	38 000	102	27 928	328
40 000	174,0	32,2	11,0	17,3	52 000	137	37 511	441
50 000	175,0	32,2	12,9	18,4	62 500	172	47 094	554
75 000	219,0	32,2	13,6	19,8	83 000	240	65 712	772
100 000	238,0	43,0	13,5	19,8	120 000	347	95 009	1 117
115 000	239,0	44,0	14,8	21,0	135 000	399	109 246	1 284
150 000	264,0	50,0	16,0	23,2	177 000	520	142 376	1 673
193 000	274,0	50,0	19,6	28,0	230 000	677	185 363	2 179
280 000	319,0	60,0	20,4	28,8	325 000	982	268 872	3 160

* Здесь и далее в табл. 3–6 применена классификация судов согласно *PIANC*.

** Давление в системе 200 бар.

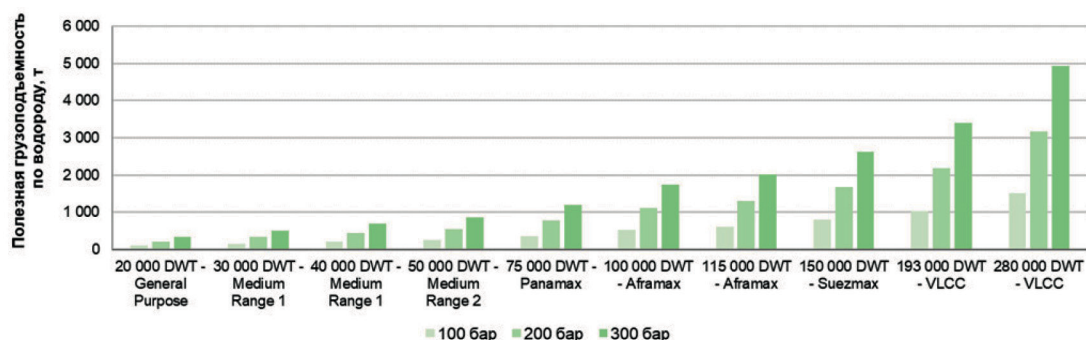
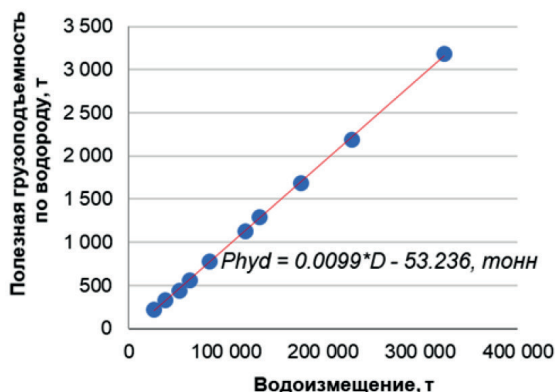


Рис. 2. Величина полезной нагрузки для судов CGH_2

Одним из возможных вариантов давления внутри системы хранения компримированного водорода является значение, не превышающее 200 бар. Эта величина, с одной стороны, приемлема с точки зрения безопасности при обращении с баллонами под давлением, а с другой — хорошо соотносится с давлением внутри подземных хранилищ водорода [11], что значительно упрощает процесс перегрузки из подземных хранилищ на суда при помощи трубопроводов высокого давления и дожимных компрессоров из-за минимальной разницы давлений в наземной и судовой системах.

а)



б)

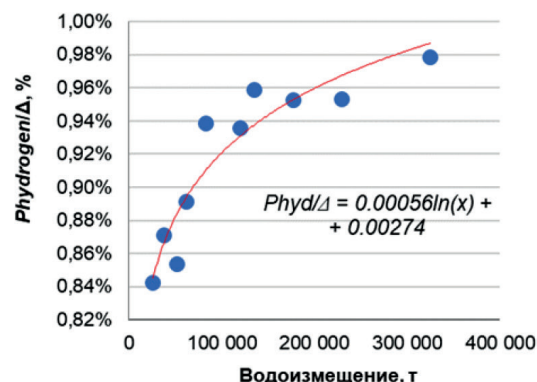


Рис. 3. Зависимость величины полезной нагрузки для CGH_2 судов от их водоизмещения (а), рост удельной грузоподъемности CGH_2 судов с увеличением их водоизмещения (б)

Таким образом, полезная грузовместимость напорных судов для перевозки сжатого водорода при давлении 200 бар может быть описана как функция от их водоизмещения (рис. 3, а), а удельная грузоподъемность, т. е. отношение массы перевозимого водорода к водоизмещению транспортного судна, ожидаемо растет вместе с увеличением водоизмещения, как показано на рис. 3, б.

Морская транспортировка водорода в сжиженном виде (LH_2)

Проекты судов для перевозки водорода в сжиженном виде (LH_2). Первые опытно — конструкторские работы, посвященные созданию проектов морских судов LH_2 были выполнены достаточно давно. В исследовании 1998 г. [12] японские инженеры представили два концептуальных проекта судов для транспортировки водорода катамаранного типа (рис. 4), отличающихся исполнением грузовой системы. Суда спроектированы с самонесущими вкладными танками типа *B*, согласно классификации ИМО, при этом в одном проекте применялись грузовые танки цилиндрической формы (*MOSS*), а в другом — призматической формы (*IHI SPB*). Наибольшая длина судов составляет 345 м (*MOSS*) и 330 м (*IHI SPB*), длина между перпендикулярами — 330 м (*MOSS*) и 310 м (*IHI SPB*), ширина — 64 м (*MOSS*) и 56 м (*IHI SPB*), высота борта — 26 м (*MOSS*) и 24 м (*IHI SPB*), осадка — 14 м. Суммарная мощность энергетической установки составляет около 60 МВт, вместимость грузовой системы обусловлена производительностью наземной установки по производству водорода, а также параметрами транспортной системы (дальностью, скоростью хода судна и временем кругового рейса) и с учетом потерь груза в результате выкипания составляет 200 000 м³, или около 14 000 т водорода. Количество грузовых танков: четыре для проекта со сферическими грузовыми танками и два для проекта с призматическими грузовыми танками. Автономность и скорость судна обусловлены принятой в исследовании транспортной линией протяженностью 6 000 морских миль, а скорость судна в 20–25 уз необходима для преодоления этого расстояния за 10 сут. Применение катамаранного типа корпуса судна обусловлено необходимостью обеспечения требований к его остойчивости в сочетании с быстроходностью, большими главными размерениями и малой осадкой, обусловленной низкой плотностью перевозимого груза. Степень испарения груза (*Boill-off rate* — *BOR*) составляет 0,2...0,4 %.

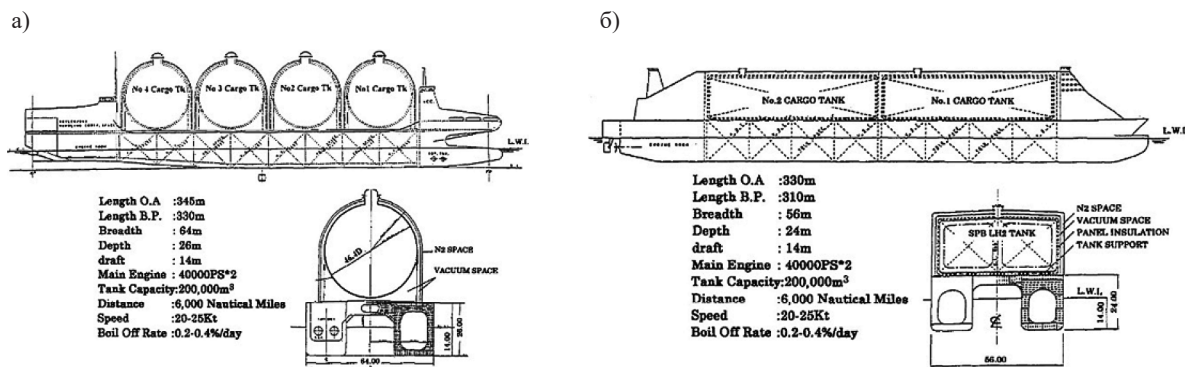


Рис. 4. Первые концептуальные проекты LH_2 японских специалистов:

а — со сферическими танками типа *MOSS*; б — с призматическими грузовыми танками

В данном проекте грузовые емкости теплоизолированы при помощи вспененных полиуретановых панелей (*PUF panel* — *polyurethane foam panel*) и вакуумированием объемов между теплоизоляцией и зашивкой грузовых танков. Также интересным решением является многофакторный подбор толщины изоляции в зависимости от *BOR* и мощности главных двигателей, использующих водород в качестве топлива (рис. 5).

После 1998 г. наблюдался длительный перерыв в разработке концептуальных проектов судов LH_2 , закончившийся в середине 2000-х гг. разработкой серии концептуальных проектов корпорации *Kawasaki Heavy Industries*, отмеченных в [13]. Длительная работа над ними привела к созданию проекта судна LH_2 вместимостью 160 000 м³, получившему в апреле 2022 г. принципиальное одобрение *ClassNK* (рис. 6, а). Его наибольшая длина 346 м, ширина 57 м, осадка 9,5 м, вместимость

мость грузовой системы с учетом потерь груза в результате его выкипания составляет 160 000 м³. Количество грузовых танков — четыре. В грузовых резервуарах используется недавно разработанная высокоэффективная система изоляции, которая сводит к минимуму испарение газа, однако дополнительных сведений о ней в открытых источниках нет. Энергетическая установка питается отпарным водородом и состоит из котла и паротурбинной установки. Кроме того, судно оборудовано системой подачи топливного водорода, включающей компрессоры для сжатия водорода, теплообменное и другое оборудование.

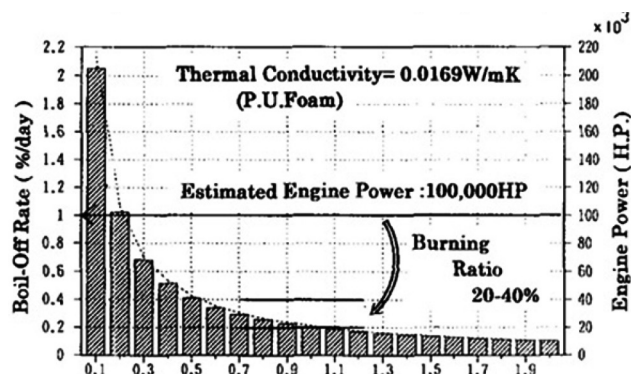


Рис. 5. Корреляция толщины теплоизоляции и степени испарения груза (BOR)

а)



б)



Рис. 6. Проект водородовоза LH₂ (Kawasaki Heavy Industries, Ltd.) (а) и проект бункеровщика LH₂ (Moss Maritime) (б)

В 2019 г. компании *Equinor*, *Wilhelmsen*, *DNV GL* и *Moss Maritime* презентовали совместно разработанный концептуальный проект бункеровщика сжиженным водородом (рис. 6, б). Его наибольшая длина составляет 137,0 м, ширина — 19,8 м. Суммарная мощность энергетической установки 6 МВт, грузовместимость судна 9 000 м³ (2 × 4 500 м³), грузоподъемность 500 т. Количество грузовых танков: 2 танка типа С согласно классификации ИМО. Автономность судна составляет 20 000 морских миль, скорость — 15 уз.

Использование напорных самонесущих вкладных танков типа С, выдерживающих повышенное внутреннее давление до 5 бар, позволяет хранить испарившийся водород внутри грузового резервуара вместо его удаления для использования или повторной утилизации и принимать водород в грузовой танк без дополнительного охлаждения танков после выполнения балластного рейса. Примененный здесь грузовой танк представляет собой двустенный сосуд, работающий под давлением, при этом пространство между внутренним и внешним сосудом вакуумировано и заполнено внутри многослойной изоляцией (*Multi-Layer Insulation*), уменьшающей лучевой перенос тепла. На внешнюю оболочку дополнительно нанесена полиуретановая изоляция толщиной 300 мм, выступающая в качестве дополнительной меры для сохранения теплового баланса внутри грузового резервуара в случае потери вакуума в его межстенном пространстве. Снаружи грузовые резервуары

покрыты капом — экраном для защиты грузовых резервуаров от влаги и ультрафиолетовых лучей. Пространство между грузовыми резервуарами и защитным внешним капом заполнено азотом под давлением чуть выше 1 бар, состав атмосферы в этом пространстве подлежит постоянному контролю.

Еще один проект газовоза LH_2 представлен в исследовании [14], где дана подробная оценка его конструкции и примененных при его создании принципиальных решений. Газовоз спроектирован вокруг четырех цилиндрических танков объемом $\sim 280\,000\text{ м}^3$, отпарной газ из которых используется для судовых нужд. Судно имеет длину 370 м, ширину 75 м, осадку в грузу 10 м, оно способно перевозить 20 000 т водорода, при этом его водоизмещение составляет 232 000 т. Энергетическая установка состоит из нескольких газовых паротурбинных установок суммарной мощностью около 50 МВт. Давление паров груза в грузовой системе может быть повышено до 0,5 МПа, что оказывает значительное влияние на массу грузовых танков и определяет размеры и водоизмещение судна.

Наиболее инновационным и в некоторой мере футуристичным проектом газовоза LH_2 является *C-Job* (рис. 7), являющийся продуктом совместной деятельности компании *C-Job Naval Architects* и *LH₂ Europe*. В качестве источника энергии используются водородные топливные элементы. Наибольшая длина газовоза составляет 141,75 м, длина между перпендикулярами — 135,75 м, ширина — 34,90 м, осадка — 5,8 м, высота борта — 8,75 м. Суммарная мощность ЭУ составляет около 5 МВт, грузопместимость — $37\,500\text{ м}^3$ ($3 \times 12\,500\text{ м}^3$), скорость — 14 уз, а экипаж — 14 человек.



Рис. 7. Проект водородовоза LH_2 *C-Job*

1 февраля 2024 г. французский энергетический гигант *TotalEnergies* и компания *GTT*, получили принципиальное одобрение *Bureau Veritas* на концептуальный проект газовоза LH_2 грузопместимостью $150\,000\text{ м}^3$, оснащенного грузовой системой *GTT*, изготовленной по мембранной технологии³. К сожалению, больше информации ни о конструктиве судна, ни об его энергетической установке в открытом доступе не имеется.

Суда, предназначенные для перевозки водорода в сжиженном виде (LH_2). История транспортировки жидкого водорода водным транспортом началась еще в 60-х гг. XX в. Первый опыт транспортировки жидкого водорода на водном транспорте получило Национальное управление по авиации и исследованию космического пространства США (*NASA*), использующее жидкий водород в качестве топлива в своей космической программе *Space Shuttle* до самого ее закрытия в 2011 г. На рис. 8, а показан процесс буксировки баржи с установленной на ее палубе емкостью с жидким водородом. Несмотря на оригинальность технологии конструкция речного баржебуксирного состава исключает возможность использования ее в качестве прототипа для морских перевозок водорода.

³ TotalEnergies, GTT win BV's nod for large-scale LH2 carrier design // Информационный портал Offshore-energy.biz. URL: <https://www.offshore-energy.biz/totalenergies-gtt-win-bvs-nod-for-large-scale-lh2-carrier-design/> (дата обращения: 23.04.2024).

а)



б)

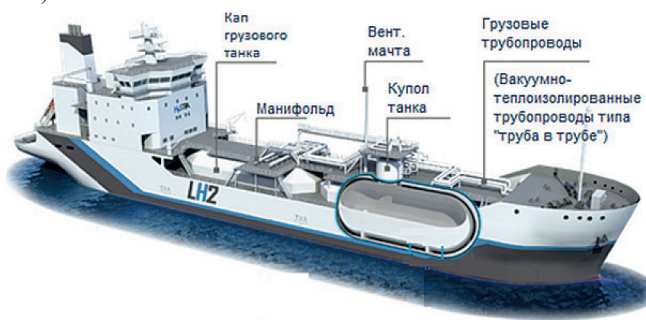


Рис. 8. Буксир *Clermont II*, доставляющий жидкий водород через систему каналов в космическом центре NASA «Стеннис» (а), газозов для транспортировки сжиженного водорода *Suiso Frontier* (б)

В отличие от технологии CGH_2 технология LH_2 уже успешно реализована в проекте *HySTRA*. В рамках этого проекта реализована цепочка поставок производимого из бурого угля водорода из Австралии в Японию. Основным элементом цепочки поставок является судно для перевозки LH_2 под названием *Suiso Frontier*⁴, спроектированное и построенное компанией *Kawasaki Heavy Industry* (Япония) под наблюдением *Class NK* (рис. 8, б).

Судно имеет длину 116 м, ширину 19 м, высоту борта 10,6 м и осадку 4,5 м. Численность экипажа составляет 25 человек, эксплуатационная скорость — 13 уз. Два грузовых танка имеют объем 1 250 м³, что эквивалентно около 88 т жидкого водорода. Особый интерес представляет собой грузовая система, выполненная в виде цилиндрических танков типа *C* (по классификации ИМО), 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 3 600 кВт, приводящими в движение два электрических гребных мотора суммарной мощностью 2 720 кВт, обеспечивающих вращение одного винта фиксированного шага, что позволяет судну развивать заявленную скорость в 13 уз. Также на судне имеется одно подруливающее устройство туннельного типа.

Концептуальный подход к определению размерного ряда транспортных судов для перевозки водорода в сжиженном виде (LH_2). Удельная грузоподъемность судов по водороду с грузовой системой, оборудованной танками типа *C* находится в пределах 1,24...8,68 %, у судов, оборудованных танками типа *B* (сферическими самонесущими типа *MOSS* или аналогичного конструктивного исполнения) — в диапазоне 6,56...12,55 %. Однако анализ параметров грузовых систем судов показал, что различный уровень проработки проектов оказывает значительное влияние на данную характеристику: чем детальнее проработан проект, тем «скромнее» значение удельной грузоподъемности. Для единственного существующего судна *Suiso Frontier* это значение составляет наименьшие 1,24 %, у детально проработанного проекта бункеровщика водородом от известной своим вкладом в развитие технологии морской транспортировки СПГ компании *MOSS Maritime* (Норвегия) оно составляет 5,33 %, в то время как у концептуального проекта — значительные 8,68 %. Из всех исследованных проектов только в проекте LH_2 *GTT* компании *GTT* (Франция) анонсировано применение мембранной технологии хранения водорода, однако дополнительных данных о характеристиках разрабатываемой системы в открытых источниках информации нет. Большинство газозовов *LNG* в настоящее время оборудованы мембранными системами компании *GTT*, что позволяет оценить удельную грузоподъемность водородозовов большого водоизмещения на основе имеющейся информации о существующих судах СПГ.

⁴ Hydrogen Supply Chain // Официальный сайт CO₂-free Hydrogen Energy Supply-chain Technology Research Association. URL: <https://www.hystra.or.jp/en/project> (дата обращения: 08.04.2024).

В процессе дальнейшего исследования LH_2 судов следует ввести следующую градацию вместимостей и удельных грузоподъемностей для концептуального типоряда судов:

– суда дедвейтом до 40 000 т (с грузовыми танками геометрической вместимостью до 75 000 м³) — оборудуются танками типа *C* и имеют показатель удельной грузоподъемности $Phydrogen/\Delta$, равный 1,24 %;

– суда дедвейтом от 40 000 до 80 000 т (с грузовыми танками геометрической вместимостью от 75 000 до 145 000 м³) — оборудуются танками типа *B* сферической формы и имеют показатель удельной грузоподъемности $Phydrogen/\Delta$, равный 5,33 %;

– суда дедвейтом от 80 000 до 98 000 т (с грузовыми танками геометрической вместимостью от 145 000 до 175 000 м³) — оборудуются танками типа *B* сферической формы и имеют показатель удельной грузоподъемности $Phydrogen/\Delta$, равный 6,56 %;

– суда дедвейтом от 98 000 до 155 000 т (с грузовыми танками геометрической вместимостью от 175 000 до 267 000 м³) — оборудуются мембранными танками типа и имеют показатель удельной грузоподъемности $Phydrogen/\Delta$, равный 9,33 %.

Основные параметры вариантного ряда судов LH_2 представлены в табл. 3.

Таблица 3

Главные размеры и массовые характеристики систем хранения водорода LH_2 судов

Дедвейт, т	Длина Lbp , м	Ширина B , м	Осадка в грузу d , м	Высота борта, м	Водоизмещение Δ , т	Вместимость грузовых танков Q , м ³	Удельная грузоподъемность $Phyd/\Delta$, %	Полезная грузоподъемность по водороду*, т
11 000	140,0	28,0	7,7	16,0	20 000	19 000	1,24	248,0
40 000	211,0	35,0	10,0	22,5	58 000	75 000	1,24	719,2
70 000	260,0	47,2	11,8	26,5	105 000	130 000	5,33	5 596,5
80 000	274,0	48,0	12,3	26,5	114 000	145 000	5,33	6 076,2
90 000	275,0	45,6	12,5	26,0	125 000	160 000	6,56	8 200,0
98 000	284,0	46,4	12,8	26,5	135 000	175 000	6,56	8 856,0
107 000	303,0	50,0	12,5	27,0	150 000	211 000	9,33	13 995,0
120 000	304,0	50,0	13,6	27,0	165 000	216 000	9,33	15 394,5
130 000	332,0	53,8	12,2	27,0	179 000	261 000	9,33	16 700,7
155 000	333,0	55,0	13,7	27,0	206 000	267 000	9,33	19 219,8

*При атмосферном давлении и температуре $-253,1^\circ\text{C}$.

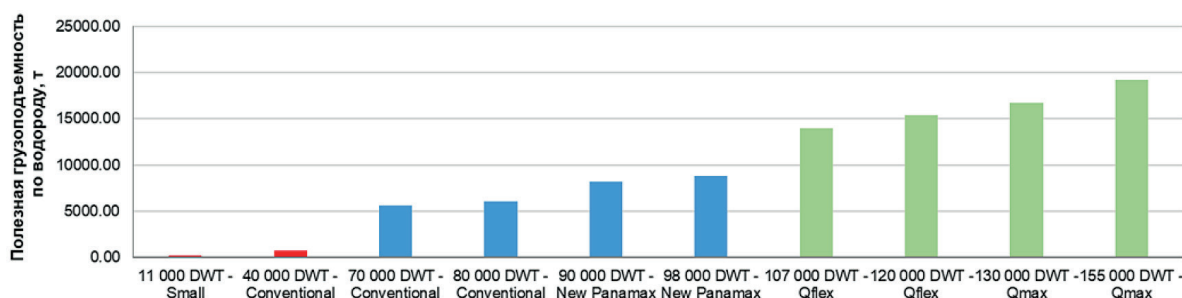


Рис. 9. Величина полезной нагрузки LH_2 судов (красный цвет — танки типа *C*, синий — танки типа *B* (Spherical-MOSS), зеленый — мембранный тип танков)

На рис. 9 приведены характеристики полезной грузоподъемности судов LH_2 по водороду в зависимости от их типоразмера и водоизмещения.

Морская транспортировка водорода в химически связанном виде при помощи жидких органических носителей (ЛОНС)

Жидкими органическими носителями водорода (ЛОНС) являются химические вещества, способные накапливать водород в своей структуре, хранить его в течение неограниченного количества

времени и контролируемо отдавать. Идеальный *LOHC* должен не только удерживать большое количество водорода, но и отвечать следующим требованиям: быть стабильной смесью, иметь быструю скорость реакции гидрирования/дегидрирования, иметь низкие показатели стоимости оборудования и энергозатрат на реакцию гидрирования / дегидрирования, быть безопасным, а также совместимым с существующими технологиями и существующей инфраструктурой [15]. Наиболее часто упоминаемыми в литературе *LOHC* являются: смесь бензола (C_6H_6) и циклогексана (C_6H_{12}), толуол (C_7H_8), нафталин ($C_{10}H_8$), *N*-этилкарбазол ($C_{14}H_{13}N$) и дибензилтолуол (DBT). В исследовании [16] авторы провели анализ этих веществ в соответствии с описанными характеристиками и определили в качестве наиболее перспективного носителя больших партий водорода дибензилтолуол (DBT).

В соответствии с паспортом вещества⁵ дибензилтолуол не является опасным веществом и требования Международного кодекса по опасным грузам (*IBC Code*) к нему неприменимы. Таким образом, учитывая его плотность ($1,035...1,045 \text{ т/м}^3$), в рамках данного исследования допустимо считать, что его перевозку можно производить с использованием наливных танкеров любых дедевейтных групп. Согласно исследованию [16], отношение массы хранимого водорода к массе жидкости-носителя (дибензилтолуол — *H18-DBT*) составляет $0,0575 : 1$. Это позволяет найти соотношение требуемой грузоподъемности судна по жидким органическим носителям к его полезной грузоподъемности по водороду (табл. 4, рис. 10).

Таблица 4

Главные размерения и полезная грузовместимость по водороду для различных типов нефтяных танкеров для перевозки жидких органических носителей водорода (DBT)

Дедвейт, т	Длина <i>Lbp</i> , м	Ширина, <i>B</i> , м	Осадка в грузу, <i>d</i> , м	Высота борта, м	Водоизмещение Δ , т	Вместимость грузовых танков Q , м ³	Полезная грузоподъемность по водороду, т	Удельная грузоподъемность $Phyd/\Delta$, %
20 000	154,0	23,0	8,5	12,7	26 000	18 500	1 064	4,09
30 000	168,0	29,0	9,5	14,0	38 000	28 000	1 610	4,24
40 000	174,0	32,2	11,0	17,3	52 000	37 500	2 156	4,15
50 000	175,0	32,2	12,9	18,4	62 500	47 000	2 703	4,32
70 000	219,0	32,2	13,6	19,8	83 000	65 800	3 784	4,56
100 000	238,0	43,0	13,5	19,8	120 000	95 000	5 463	4,55
115 000	239,0	44,0	14,8	21,0	135 000	109 300	6 285	4,66
150 000	264,0	50,0	16,0	23,2	177 000	142 500	8 194	4,63
193 000	274,0	50,0	19,6	28,0	230 000	185 300	10 655	4,63
280 000	319,0	60,0	20,4	28,8	325 000	268 800	15 456	4,76

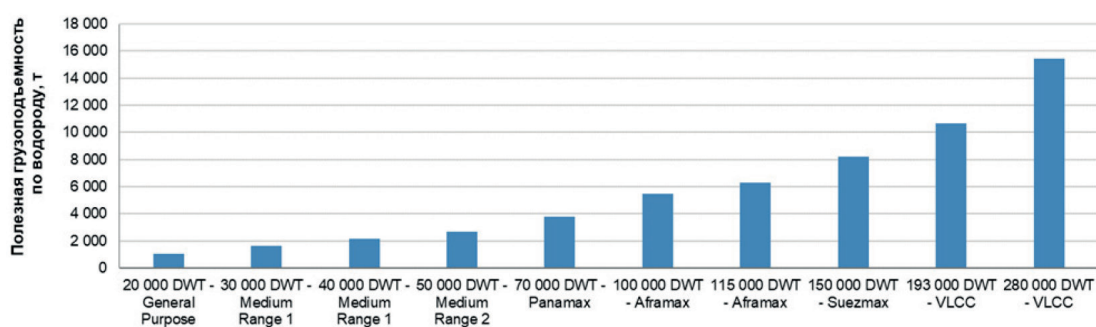


Рис. 10. Величина полезной нагрузки наливных танкеров для перевозки водорода в виде *LOHC*

Морская транспортировка водорода в виде аммиака (NH_3)

Транспортировка аммиака осуществляется газовозами *LPG*. Транспортировка аммиака в целевой порт осуществляется в сжиженном состоянии и близком к атмосферному давлению, при этом

⁵ Паспорт безопасности. Дибензилтолуол. URL: <https://h2-industries.com/wp-content/uploads/2020/10/Safety-Data-Sheet-Dibenzyltoluene.pdf>

выполняется его дополнительное охлаждение ниже его температуры кипения ($-33,4^{\circ}\text{C}$). Обусловлено это экономическими факторами, поскольку при сжижении аммиака его объем уменьшается более чем в 800 раз. Относительно низкое давление конденсации аммиака позволяет перевозить его на всех типах газозовов *LPG*.

Циркуляция по процессу Габера – Боша позволяет получать аммиак со 100 % выходом при среднем расходе электроэнергии $\sim 3\,200\text{ кВт} \cdot \text{ч}$ [16]. При этом для получения 0,1563 кг водорода необходим 1 кг NH_3 . Таким образом, можно определить фактическую вместимость по аммиаку *LPG* газозовов и соответствующую ей полезную грузоподъемность по водороду для типоразмерной линейки *LPG* газозовов всех дедейтных групп (табл. 5, рис. 11).

Таблица 5

Главные размерения и полезная грузовместимость по водороду для различных типов *LPG* газозовов для перевозки аммиака

Дедвейт*, т	Длина <i>Lbp</i> , м	Ширина <i>B</i> , м	Осадка в грузу <i>d</i> , м	Высота борта, м	Водоизмещение Δ , т	Вместимость грузовых танков Q , м ³	Полезная грузоподъемность по водороду*, т	Удельная грузоподъемность $Phyd/\Delta$, %
10 000	112,0	19,8	8,8	11,2	16 000	12 000	1 278	7,99
22 000	152,0	25,6	10,9	16,4	33 000	22 000	2 343	7,10
30 000	172,0	29,4	10,4	18,0	42 000	37 000	3 941	9,38
43 000	195,0	32,2	11,9	20,8	60 000	59 000	6 284	10,47
50 000	219,0	36,6	10,9	20,4	69 000	73 000	7 775	11,27
64 000	217,0	36,0	13,6	22,6	85 000	90 000	9 585	11,28

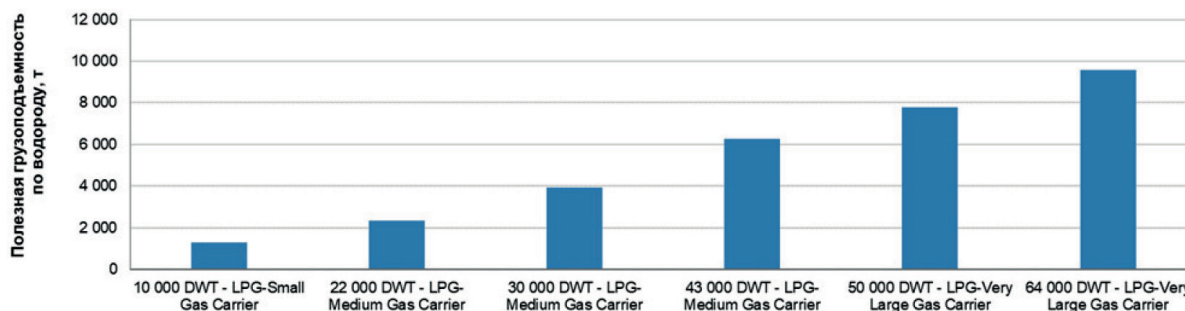


Рис. 11. Величина полезной нагрузки по водороду *LPG* газозовов для перевозки аммиака

Морская транспортировка водорода в виде метанола (CH_3OH)

Транспортировка метанола осуществляется танкерами-химовозами, т. е. наливными судами, построенными или приспособленными для перевозки опасных химических грузов наливом. Согласно Международному Кодексу постройки и оборудования судов, перевозящих опасные химические грузы наливом (*IBC Code*) [17], метанол относится к вредным веществам категории *Y* [17], [18] и должен перевозиться на танкерах-химовозах типа 3. Согласно определению из [17], это танкер-химовоз, предназначенный для перевозки продуктов, представляющих достаточно серьезную угрозу для окружающей среды и безопасности, на котором необходимо принятие мер в небольших масштабах по повышению живучести судна в поврежденном состоянии.

Транспортировка метанола из отгрузочных терминалов до потребителя осуществляется судами типа химовоз-продуктовоз. Химовоз-продуктовоз — это наливное судно, построенное или приспособленное для перевозки опасных химических грузов наливом. Согласно исследованию [16], отношение массы хранимого водорода к массе метанола составляет 0,111 : 1. Это позволяет найти соотношение требуемой грузоподъемности судна по метанолу к его полезной грузоподъемности по водороду (табл. 6, рис. 12).

Таблица 6

**Главные размерения и полезная грузоподъемность по водороду
для различных типов танкеров-химовозов для перевозки метанола**

Дедвейт*, т	Длина <i>Lbp</i> , м	Ширина <i>B</i> , м	Осадка в грузу, <i>d</i> , м	Высота борта, м	Водоиз- мещение Δ , т	Вместимость грузовых танков Q , м ³	Полезная грузо- подъемность по водороду*, т	Удельная грузоподъ- емность P_{hyd}/Δ , %
20 000	154,0	23,0	8,5	12,70	26 000	18 500	2 054	7,90
30 000	168,0	29,0	9,5	14,00	38 000	28 000	3 108	8,18
40 000	174,0	32,0	11,0	17,30	52 000	37 500	4 163	8,00
50 000	175,0	32,2	12,9	18,40	62 500	47 000	5 217	8,35
70 000	219,0	32,2	13,6	19,80	83 000	65 800	7 304	8,80
100 000	238,0	43,0	13,5	19,80	120 000	95 000	10 545	8,79
115 000	239,0	44,0	14,8	21,00	135 000	109 300	12 132	8,99

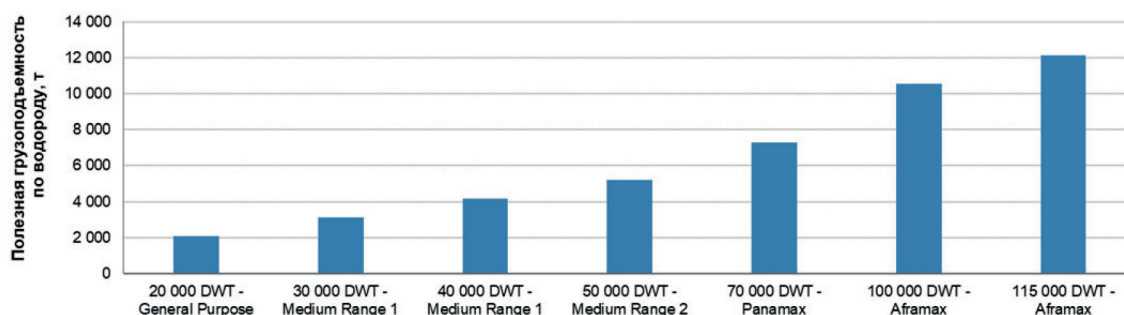


Рис. 12. Величина полезной нагрузки по водороду танкеров-химовозов для перевозки метанола

Определение оптимального с точки зрения удельной грузоподъемности способа транспортировки водорода морским транспортом

Данная проблема решается при помощи установления зависимости между размером перевозимой товарной партии водорода с учетом его специфических свойств и технико-эксплуатационными характеристиками судна для его транспортировки применительно к каждому из возможных способов его хранения на борту. Проведенное ретроспективное исследование показало, что для транспортировки водорода могут быть использованы различных типов судов, имеющие собственные конструктивные и технологические особенности. В целях их корректного сравнения необходимо определить сравниваемый диапазон водоизмещения этих судов. Например, *ЛОНС* могут перевозиться в обычных нефтяных танкерах, водоизмещение которых на мировом рынке составляет более 300 тыс. т, в то время как водоизмещение *LPG* газозовов, используемых для транспортировки сжиженного аммиака, редко превышает 80 тыс. т. Что касается концептуальных проектов судов для перевозки чистого водорода в сжатом или сжиженном виде, то в силу отсутствия какой-либо статистической выборки верхнюю границу вместимости этих типов судов определить в данный момент невозможно. Таким образом, в целях исследования необходимо ограничить рассматриваемый диапазон водоизмещения тем диапазоном, в котором возможно сравнение всех типов судов, т. е. от 25 до 80 тыс. т (рис. 13).

Таким образом, способы транспортировки водорода морским транспортом могут быть ранжированы по критерию уменьшения удельной грузоподъемности по водороду следующим образом:

- 1) газозов *LPG* (аммиак — NH_3) — P_{hyd}/Δ составляет 7,99–11,28 %;
- 2) танкер-химовоз (метанол — CH_3OH) — P_{hyd}/Δ составляет 7,9–8,8 %;
- 3) нефтяной танкер (жидкий органический носитель — дибензинтолуол (DBT) — P_{hyd}/Δ составляет 4,09–4,56 %;

4) газовоз для транспортировки водорода в сжиженном виде (LH_2) — P_{hyd}/Δ составляет 1,24–5,33 %;

5) газовоз для транспортировки водорода в сжатом виде (CGH_2) — P_{hyd}/Δ составляет от 0,84 до 0,89 %.

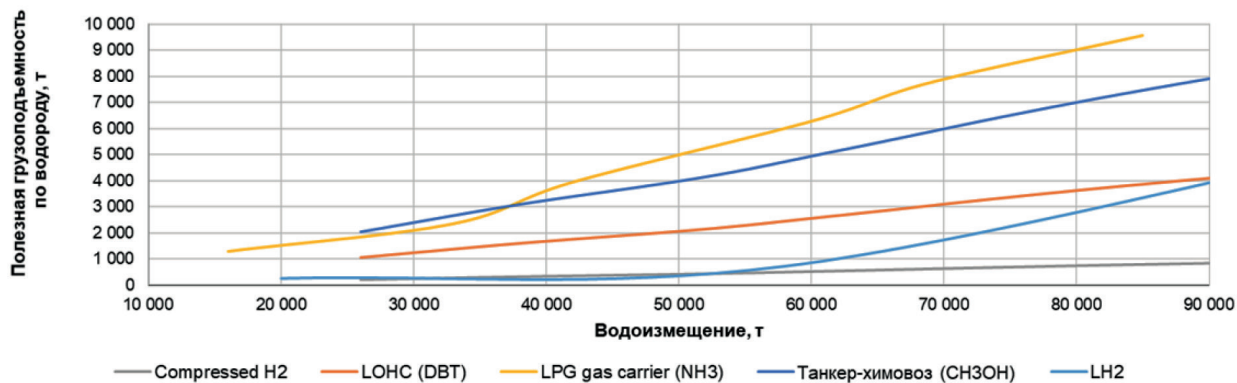


Рис. 13. Графики зависимости полезной грузоподъемности судов от их водоизмещения применительно к различным способам транспортировки водорода: CGH_2 , LH_2 , LOHC (DBT), NH_3 и CH_3OH

Представленную на рис. 13 графическую информацию можно интерпретировать следующим образом:

- полезная грузоподъемность по водороду судов рассматриваемого диапазона водоизмещения (до 80 тыс. т) не превышает 9 000 т;
- полезная грузоподъемность по водороду судов рассматриваемого диапазона водоизмещения (до 80 тыс. т), перевозящих его в «чистом» виде и в связанном с жидким органическим носителем виде, не превышает 3 000 т;
- при размере товарной партии водорода более 3 000 т и наличии ограничений на главные размерения транспортного судна, лимитирующих его водоизмещение вплоть до 80 тыс. т, транспортировку аммиака или метанола необходимо осуществлять в химически связанном виде на судах соответствующих типов;
- при размере товарной партии водорода до 500 т ее можно перевозить на судах LH_2 и CGH_2 , при этом суда этих типов будут иметь одинаковое водоизмещение вплоть до 50–54 тыс. т;
- в диапазоне водоизмещения 25–37 тыс. т танкеры-химовозы для транспортировки водорода в виде метанола демонстрируют наилучшие показатели удельной грузоподъемности, при значении водоизмещения более 37 тыс. т их сменяют суда-газовозы для транспортировки водорода в виде аммиака;
- при необходимости транспортировки товарной партии водорода более 9 000–10 000 тыс. т использование газовозов LPG для транспортировки водорода в виде аммиака невозможно в силу отсутствия на фрахтовом рынке судов достаточного водоизмещения.

Заключение (Conclusion)

В работе рассмотрены проекты судов и существующие суда для перевозки водорода в различных его агрегатных состояниях и химически связанном виде. Определение зависимости между размером перевозимой товарной партии водорода с учетом его специфических свойств и технико-эксплуатационными характеристиками судна для его транспортировки применительно к каждому из возможных способов его хранения на борту позволило найти оптимальный с точки зрения удельной грузоподъемности способ транспортировки водорода морским транспортом транспортными судами, имеющими водоизмещение в диапазоне 25...80 тыс. т. Оптимальными с точки зрения удельной грузоподъемности в рассматриваемом диапазоне водоизмещения являются газовозы LPG и танкеры-химовозы для транспортировки аммиака и метанола соответственно.

Концептуальные проекты судов для транспортировки водорода в «чистом» (сжатом или сжиженном) виде показали самые скромные результаты. Промежуточное положение занимает способ транспортировки водорода при помощи жидких органических носителей. Полученные результаты могут быть использованы при решении задач определения себестоимости транспортировки водорода в зависимости от его агрегатного состояния и используемого судна, т. е. могут быть полезны как на ранних этапах экономических исследований, так и в рамках предпроектной проработки концепта судна для транспортировки водорода.

ЛИТЕРАТУРА

1. Буянов А. С. Формирование методологического подхода к процессу определения углеродного следа транспортной услуги с использованием коэффициентов энергоэффективности судна / А. С. Буянов, А. С. Реуцкий // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. — 2023. — № 70/71. — С. 13–28.
2. Буянов А. С. Коэффициент энергоэффективности как инструмент определения углеродного следа от работы морских судов ледовых классов / А. С. Буянов, В. В. Якимов, А. С. Реуцкий // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. — 2023. — № 72/73. — С. 21–31.
3. Буянов А. С. Анализ опыта применения метанола и этанола в качестве топлива на судах / А. С. Буянов, О. Н. Леонова, А. С. Реуцкий // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. — 2021. — № 64/65. — С. 91–97.
4. Heid B. Five charts on hydrogen's role in a net-zero future McKinsey & Company.[Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://www.mckinsey.com/capabilities/sustainability/our-insights/five-charts-on-hydrogens-role-in-a-net-zero-future> (дата обращения 20.09.2023).
5. Berger R. Prosperity at Risk: For a New Strategy in Energy Policy / R. Berger et al. — 2022. — Pp. 1–7.
6. Di Lullo G. Large-scale long-distance land-based hydrogen transportation systems: A comparative techno-economic and greenhouse gas emission assessment / G. Di Lullo et al. // International Journal of Hydrogen Energy. — 2022. — Vol. 47. — Is. 83. — Pp. 35293–35319.
7. Шамрай Ф. А. Доступные сегодня технологии хранения и транспортировки водорода. / Ф. А. Шамрай // Деловой журнал NEFTEGAZ. RU. — 2022. — № 1(121). — С. 50–55.
8. 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.
9. Буянов А. С. Методы оценки стоимости перевозки грузов морским транспортом в условиях ограниченного информационного обеспечения / А. С. Буянов // Транспорт Российской Федерации. — № 3 (94). — 2021. — С. 22–27.
10. Власьев М. В. Формирование морской транспортно-технологической системы перевозки сжатого природного газа (CNG-технология) / М. В. Власьев, Г. Ф. Демешко // Труды Крыловского государственного научного центра. — 2018. — Спец. вып. 2. — С. 160–168.
11. Сафарова Е. А. Особенности эксплуатации объектов подземного хранения газа при совместном хранении метана и водорода / Е. А. Сафарова, Д. С. Филиппова, В. Е. Столяров // Научный журнал Российского газового общества. — 2021. — № 3. — С. 58–63.
12. Abe A. Studies of the large scale transportation of the liquid Hydrogen / A. Abe // Proceedings of the 11th World Hydrogen Energy Conference. — 1996. — Vol. 2. — С. 1145–1154.
13. Kamiya S., Study on introduction of CO₂ free energy to Japan with liquid hydrogen / S. Kamiya, M. Nishimura, E. Harada // Physics Procedia. — 2015. — Т. 67. — С. 11–19.
14. Alkhaledi A. N. A hydrogen fuelled LH₂ tanker ship design / A. N. Alkhaledi, S. Sampath, P. Pilidis // Ships and Offshore Structures. — 2022. — Vol. 17. — Is. 7. — Pp. 1555–1564.
15. Modisha P. M. The prospect of hydrogen storage using liquid organic hydrogen carriers / P. M. Modisha et al. // Energy & fuels. — 2019. — Vol. 33. — Is. 4. — Pp. 2778–2796.
16. Abdin Z. Large-scale stationary hydrogen storage via liquid organic hydrogen carriers / Z. Abdin et al. // Iscience. — 2021. — Vol. 24. — Is. 9. — Pp. 1–23.
17. Международный Кодекс постройки и оборудования судов, перевозящих опасные химические грузы наливом (Кодекс МКХ). — СПб.: ЗАО «ЦНИИМФ», 1997. — 463 с.

18. Международная Конвенция по предотвращению загрязнения с судов (МАРПОЛ 73/78). Приложение II: Правила предотвращения загрязнения вредными веществами, перевозимыми наливом. — СПб.: АО «ЦНИИМФ», 2017. — 824 с.

REFERENCES

1. Buyanov, A. S., Reuckij, A. S. "Formirovanie metodologicheskogo podhoda k processu opredeleniya uglerodnogo sleda transportnoj usluzhi s ispol'zovaniem koefficientov energoeffektivnosti sudna." *Nauchno-tekhnicheskij sbornik Rossijskogo morskogo registra sudohodstva* 70/71 (2023): 13–28.
2. Buyanov, A. S., YAkimov, V. V., Reuckij, A. S. "Koefficient energoeffektivnosti kak instrumentopredeleniya uglerodnogo sleda ot raboty morskikh sudov ledovykh klassov." *Nauchno-tekhnicheskij sbornik Rossijskogo morskogo registra sudohodstva* 72/73 (2023): 21–31.
3. Buyanov, A. S., Leonova, O. N., Reuckij, A. S. "Analiz opyta primeneniya metanola i etanola v kachestve topliva na sudah." *Nauchno-tekhnicheskij sbornik Rossijskogo morskogo registra sudohodstva* 64/65 (2021): 91–97.
4. Heid B. et al Five charts on hydrogen's role in a net-zero future McKinsey & Company. Web. 20 Sept. 2023 <<https://www.mckinsey.com/capabilities/sustainability/our-insights/five-charts-on-hydrogens-role-in-a-net-zero-future>>.
5. Berger R Prosperity at Risk: For a New Strategy in Energy Policy / R. Berger et al. (2022): 1–7.
6. Di Lullo, Giovanni, et al. "Large-scale long-distance land-based hydrogen transportation systems: A comparative techno-economic and greenhouse gas emission assessment." *International Journal of Hydrogen Energy* 47.83 (2022): 35293–35319.
7. SHamraj F. A. "Dostupnye segodnya tekhnologii hraneniya i transportirovki vodoroda." *Delovoj zhurnal NEFTEGAZ.RU* 11 (2022): 50–55.
8. Makaryan, I. A., Sedov, I. V., Maksimov, A. L. "Hranenie vodoroda s ispol'zovaniem zhidkih organicheskikh nositelej (obzor)." *ZHurnal prikladnoj himii* 93.12 (2020): 1716–1733.
9. Buyanov, A. S. "Metody ocenki stoimosti perevozki грузов морским транспортом в условиях ограниченного информационного обеспечения." *Transport Rossijskoj Federacii* 3(94) (2021): 22–27.
10. Vlas'ev, M. V., Demeshko, G. F. "Formirovanie morskoy transportno-tekhnologicheskoy sistemy perevozki szhatogo prirodnogo gaza (CNG-tekhnologiya)." *Trudy Krylovskogo gosudarstvennogo nauchnogo centra* Spec. vyp. 2 (2018): 160–168.
11. Safarova, E. A., Filippova, D. S., Stolyarov, V. E. "Osobennosti ekspluatatsii ob'ektov podzemnogo hraneniya gaza pri sovместном хранении метана i vodoroda." *Nauchnyj zhurnal Rossijskogo gazovogo obshchestva* 3 (2021): 58–63.
12. Abe, A. "Studies of the large scale transportation of the liquid Hydrogen." *Proceedings of the 11th World Hydrogen Energy Conference* 2 (1996): 1145–1154.
13. Kamiya, S., Nishimura, M., Harada, E. "Study on introduction of CO₂ free energy to Japan with liquid hydrogen." *Physics Procedia* 67 (2015): 11–19.
14. Alkhaledi, A. N., Sampath, S., Pilidis, P. "A hydrogen fuelled LH₂ tanker ship design." *Ships and Offshore Structures* 17.7 (2022): 1555–1564.
15. Modisha, P. M. et al "The prospect of hydrogen storage using liquid organic hydrogen carriers." *Energy & fuels* 33.4 (2019): 2778–2796.
16. Abdin Z. "Large-scale stationary hydrogen storage via liquid organic hydrogen carriers." *Iscience* 24.9 (2021): 1–23.
17. *Mezhdunarodnyj Kodeks postrojki i oborudovaniya sudov, perevozyashchih opasnye himicheskie грузы наливом (Kodeks MKKH)*. SPb.: ZAO «CNIIMF», 1997.
18. *Mezhdunarodnaya Konvenciya po predotvrashcheniyu zagryazneniya s sudov (MARPOL 73/78). Prilozhenie II: Pravila predotvrashcheniya zagryazneniya vrednymi veshchestvami, perevozymymi naliveom*. SPb.: AO «CNIIMF», 2017.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Реуцкий Александр Сергеевич —
кандидат технических наук, старший эксперт
ФАУ «Российский морской регистр судоходства»
191181, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
ул. Миллионная, д. 7, литера А
e-mail: reutskii.as@rs-class.org

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Reutskii Aleksandr Sergeevich —
PhD, Senior Expert
FAI «Russian Maritime Register of Shipping»
7-A, Millionnaya str., Saint-Petersburg, 191181,
Russian Federation
e-mail: reutskii.as@rs-class.org

Буянов Александр Сергеевич —

кандидат экономических наук,
заместитель генерального директора
АО «ЦНИИМФ»

191015, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
Кавалергардская улица, д. 6, лит. А
e-mail: buyanovas@cniimf.ru

Буцанец Артем Александрович —

кандидат технических наук, начальник отдела
НТИ и ИС

ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»

198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7
e-mail: butsanetsaa@gumrf.ru

Buyanov Aleksandr Sergeevich —

PhD,
Deputy Director General
JSC “CNIIMF”

191015, Russian Federation, Saint Petersburg,
Kavalerghardskaya street, 6, lit. A
e-mail: buyanovas@cniimf.ru

Butsanets, Artem A. —

PhD,
Head of the Department
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping

5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,
Russian Federation
e-mail: butsanetsaa@gumrf.ru

Статья поступила в редакцию 25 сентября 2024

Received: September 25, 2024