

ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ВАРИАНТОВ МОРСКОЙ ТРАНСПОРТИРОВКИ ВОДОРОДА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДОВ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

УДК 629.5.014::656.614.38::661.96

EDN: UWCOBO

А.С. Буянов, к.э.н., АО «ЦНИИМФ» (Санкт-Петербург, Россия),

BuyanovAS@cniimf.ru

О.М. Мудрова, к.т.н., АО «ЦНИИМФ», MudrovaOM@cniimf.ru

А.Н. Гончарова, АО «ЦНИИМФ», GoncharovaAN@cniimf.ru

А.В. Швец, АО «ЦНИИМФ», ShvetsAV@cniimf.ru

Г.В. Бердин, ПАО «Газпром» (Санкт-Петербург, Россия),

G.Berdin@adm.gazprom.ru

М.С. Кораблева, к.э.н., ПАО «Газпром», M.Korableva@adm.gazprom.ru

А.В. Лобанов, к.т.н., ПАО «Газпром», AL.Lobanov@adm.gazprom.ru

В статье рассмотрен мировой опыт транспортировки сжиженного водорода, аммиака и жидкого органического носителя водорода морскими судами, показаны преимущества и недостатки каждого из способов. Выполнено технико-экономическое обоснование вариантов морской транспортировки для проектов по производству и поставке водорода, реализуемых в различных географических районах, с использованием созданной математической модели.

Новизна подхода заключается в разработке математической модели для оценки стоимости морской транспортировки водорода в различных формах (сжиженный водород, аммиак и жидкий органический носитель водорода). До настоящего времени такого рода исследования в России не выполнялись. Разработаны концептуальные проекты судов-газовозов для перевозки сжиженного водорода, оценена их эффективность по сравнению с традиционными типами судов – газовозами СУГ и танкерами-продуктовозами для транспортировки аммиака и жидкого органического носителя водорода соответственно. Представлены основные этапы формирования 132 расчетных транспортно-логистических схем для перемещения рассматриваемых грузов по маршрутам разной протяженности, в том числе через Суэцкий канал, мыс Доброй Надежды и по Северному морскому пути. Описан созданный для выполнения сравнительных расчетов инструментарий, приведены структура, содержание и последовательность расчетов. В качестве иллюстрации работы модели показаны результаты, полученные для оптимальных транспортно-логистических схем. В заключение сформулирован вывод о наиболее экономически эффективной форме транспортировки водорода при существующем уровне развития технологий и доказана полезность применения представленного в статье подхода для обоснования технической и экономической целесообразности использования морских судов различного назначения.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: ВОДОРОД, МОРСКАЯ ТРАНСПОРТИРОВКА, СУДНО, ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ, МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ, МОДЕЛЬ.

ВОДОРОДНАЯ СТРАТЕГИЯ

С 2017 г. 52 страны, на которые приходится более 70 % мирового ВВП, приняли национальные водородные стратегии. Это позволяет говорить о перспективах увеличения объемов мировой торговли данным энергоносителем

в 2030–2050 гг. [1]. Практически во всех стратегиях отмечается важное значение водорода для декарбонизации транспортного и промышленного секторов.

Первым стратегическим документом, в котором обозначено отношение нашей страны

к водородной энергетике, стала «Энергетическая стратегия Российской Федерации на период до 2035 года» [2] (далее – Стратегия), принятая в июне 2020 г. Согласно Стратегии до 2024 г. в России должен был появиться высокопроизводительный



A.S. Buyanov, PhD in Economy, CNIIMF (Saint Petersburg, Russia), BuyanovAS@cniimf.ru

O.M. Mudrova, PhD in Engineering, CNIIMF, MudrovaOM@cniimf.ru

A.N. Goncharova, CNIIMF, GoncharovaAN@cniimf.ru

A.V. Shvets, CNIIMF, ShvetsAV@cniimf.ru

G.V. Berdin, PJSC Gazprom (Saint Petersburg, Russia), G.Berdin@adm.gazprom.ru

M.S. Korableva, PhD in Economy, PJSC Gazprom, M.Korableva@adm.gazprom.ru

A.V. Lobanov, PhD in Engineering, PJSC Gazprom, AL.Lobanov@adm.gazprom.ru

Feasibility study of maritime hydrogen transportation options using mathematical modeling

The article reviews global practices in transportation of liquid hydrogen, ammonia, and liquid organic hydrogen carriers by seagoing vessels, and shows the advantages and disadvantages of each method. It provides a feasibility study of maritime transportation options for hydrogen production and supply projects in various geographic areas using a developed mathematical model.

The novelty of the approach lies in the development of a mathematical model to estimate the cost of maritime transportation of hydrogen in various forms (liquid hydrogen, ammonia, and liquid organic hydrogen carriers). Such studies have not been carried out in Russia yet. Gas carriers for the transportation of hydrogen in liquid form have been conceptually designed and compared with conventional types of vessels – LPG carriers and product tankers for transporting ammonia and liquid organic hydrogen carrier, respectively. The article describes the milestones of calculating 132 logistics schemes for the movement of the cargo along routes of varying lengths, including the Suez Canal, Cape of Good Hope, and Northern Sea Route. It describes the tools created for comparative calculations, the structure, content, and sequence of calculations. The article shows the results for optimal logistics schemes as an illustration of the model. The authors make a conclusion about the most cost-effective method of hydrogen transportation at the current level of technology development and prove the practicality of using the approach presented in the article to substantiate the technical and economic feasibility of using seagoing vessels of various uses.

KEYWORDS: HYDROGEN, MARITIME TRANSPORTATION, VESSEL, FEASIBILITY STUDY, MATHEMATICAL MODELING, MODEL.

и экспортно ориентированный сектор, который, как планировалось, должен был обеспечить «развитие производства и потребления водорода, вхождение Российской Федерации в число мировых лидеров по его производству и экспорту». Производство водорода и водородно-метановых смесей было обозначено как перспективное направление диверсификации и повышения эффективности использования природного газа [3].

Задачи, обозначенные в водородном разделе Стратегии, по большей части были нацелены на увеличение производства за счет разработки и реализации мер господдержки (в том числе законодательной), создания отечественных технологий, стимулирования спроса и пр. Показателем решения задачи развития водородной энергетики определен объем экспорта водорода: к 2024 г. – 0,2 млн т, к 2035 г. – 2,0 млн т [2].

В октябре 2020 г. Правительство России приняло план (дорожную карту) «Развитие водородной

энергетики в Российской Федерации до 2024 года». Обозначенные в нем мероприятия носили подготовительный характер: разработка концепции, подготовка предложений, разработка форм представления информации, мер господдержки и пр. [3].

Первым детализированным государственным документом в области водородной энергетики в нашей стране стала «Концепция развития водородной энергетики в Российской Федерации» (далее – Концепция), которая была принята в августе 2021 г. [4]. В ней можно выделить два основных посыла.

Первый: «Водород может быть использован для накопления, хранения и доставки энергии и рассматривается в качестве перспективного энергоносителя и инструмента для решения задач по развитию низкоуглеродной экономики и снижению антропогенного влияния на климат».

Второй: «В мире в настоящее время наблюдается повышение

внимания к развитию водородного направления. Многие страны мира приняли специализированные государственные стратегии и дорожные карты по развитию водородной энергетики. Для России развитие отечественной водородной энергетики является естественным ходом развития науки и технологий и продолжением традиционного для нашей страны ресурсосберегающего подхода».

Концепция предполагала поэтапный рост экспорта водорода от 200 тыс. т в 2025 г. до 15 млн т к 2050 г. Одним из ключевых рынков рассматривалась Европа, и прежде всего Германия как основной инициатор и генератор безуглеродных энергетических проектов.

После введения санкций и отъезда европейских компаний сотрудничать с Россией акценты в развитии водородной энергетики изменились. Оценки объемов экспорта снизились, большее внимание стало уделяться созданию отечественных технологий,

оборудования и устройств для производства, хранения, транспортировки и использования водорода. Результатом этих изменений стала дорожная карта развития высокотехнологичного направления «Водородная энергетика» на период до 2030 г., утвержденная в феврале 2023 г. Межведомственной рабочей группой по развитию водородной энергетики в Российской Федерации (Правительство Российской Федерации совместно с ПАО «Газпром» и ГК «Росатом») [4].

После принятия Концепции в нашей стране произошел «водородный бум». Появилось большое количество новых проектов по производству низкоуглеродного и возобновляемого водорода. Министерством промышленности и торговли Российской Федерации подготовлен «Атлас российских проектов по производству низкоуглеродного и безуглеродного водорода и аммиака» [5].

На сегодняшний день основными отечественными лидерами в водородном секторе остаются ПАО «Газпром», ГК «Росатом» и ПАО «НОВАТЭК». Указанные компании изучают технологии производства, хранения и транспортировки водорода, прорабатывают возможности его использования в различных отраслях промышленности. С их участием намечено создание крупнейших кластеров по производству водорода на Сахалине, в Якутии, на Ямале, в Восточной Сибири и на Северо-Западе [6].

Однако к настоящему времени многие из заявленных в 2021 г. проектов так и не продвинулись в своем развитии в значительной степени.

Следует отметить формирование кластера в Сахалинской обл., где планируется строительство завода по производству водорода из природного газа методом паровой конверсии метана. Кроме того, в регионе реализуется пилотный проект по использованию водорода на железнодорожном транспорте. На острове планиру-

ется проложить железнодорожную ветку, по которой будут ходить только водородные поезда. Власти Сахалинской обл. рассматривают в качестве перспективного направления получение зеленого водорода и намерены до 2030 г. наладить его производство до 100 тыс. т/год.

Таким образом, можно сказать, что для России, несмотря на существенное изменение геополитических условий, развитие водородной энергетики сохраняет значимость с точки зрения технологической безопасности страны. Если в мире сформируется новая отрасль, основанная на водородных технологиях, любое отставание в будущем приведет к неизбежной зависимости от лидеров этой отрасли.

Основная цель России в области водородной энергетики – создание отечественных технологий, а также обеспечение конкурентоспособности экономики страны в условиях глобального энергетического перехода. При этом следует учитывать, что развитию рынка водородной энергетики препятствуют высокие издержки производства и хранения водорода, сложности его транспортировки и потери энергии на каждом этапе цепочки создания стоимости.

СПОСОБЫ МОРСКОЙ ТРАНСПОРТИРОВКИ ВОДОРОДА

Водород – бесцветный горючий газ без запаха, в 14,5 раза легче воздуха, плохо растворим в воде и органических растворителях, но хорошо растворим в некоторых металлах: никеле, палладии, платине. Водород быстрее других газов распространяется в пространстве, проходит через мелкие поры, при высоких температурах сравнительно легко проникает сквозь сталь и другие материалы. Плотность газообразного водорода равна 0,09 кг/м³ (н. у.). В нормальных условиях молекулярный водород обладает относительно низкой реакционной способностью, что объясняется высокой прочностью связей в молекуле.

Жидкий водород относится к криогенным жидкостям. Его специфические свойства: низкая температура кипения при атмосферном давлении (20,28 К), малая теплота парообразования (442 кДж/кг), узкий диапазон температур ($\Delta T = 19$ °С) и давлений ($\Delta P = 1,2$ МПа) в области двухфазного состояния «жидкость – пар», при которых существует жидкость. Плотность жидкого водорода (70,8 кг/м³) в 11,5 раза меньше, чем жидкого азота, и в 16 раз – жидкого кислорода. Как криогенная жидкость водород существует в очень узком интервале температур: от точки кипения –252,77 °С до точки замерзания –259,19 °С, когда он переходит в твердое состояние.

Именно эти физико-химические свойства водорода и определяют различные варианты его хранения и транспортировки, в том числе морскими судами. Первый важный момент – выбор материала, из которого изготавливаются системы хранения. Обычная сталь в процессе эксплуатации насыщается водородом, и единственный способ снижения риска водородного повреждения – контроль ее микроструктуры и ограничение действующих на нее напряжений.

Общие принципы выбора материала для систем хранения и оборудования, контактирующих с водородом, описаны в серии стандартов ISO 15156. Они используются для этих целей в нефтегазовой промышленности. В отечественной практике существуют национальные стандарты, основанные на более ранних версиях упомянутой серии документов ISO 15156:

– ГОСТ Р 53679–2009 (ISO 15156-1:2001) [7];

– ГОСТ Р 53678–2009 (ISO 15156-2:2003) [8].

В наиболее общем виде требования к материалам, используемым при изготовлении оборудования для обращения чистого водорода в различных агрегатных

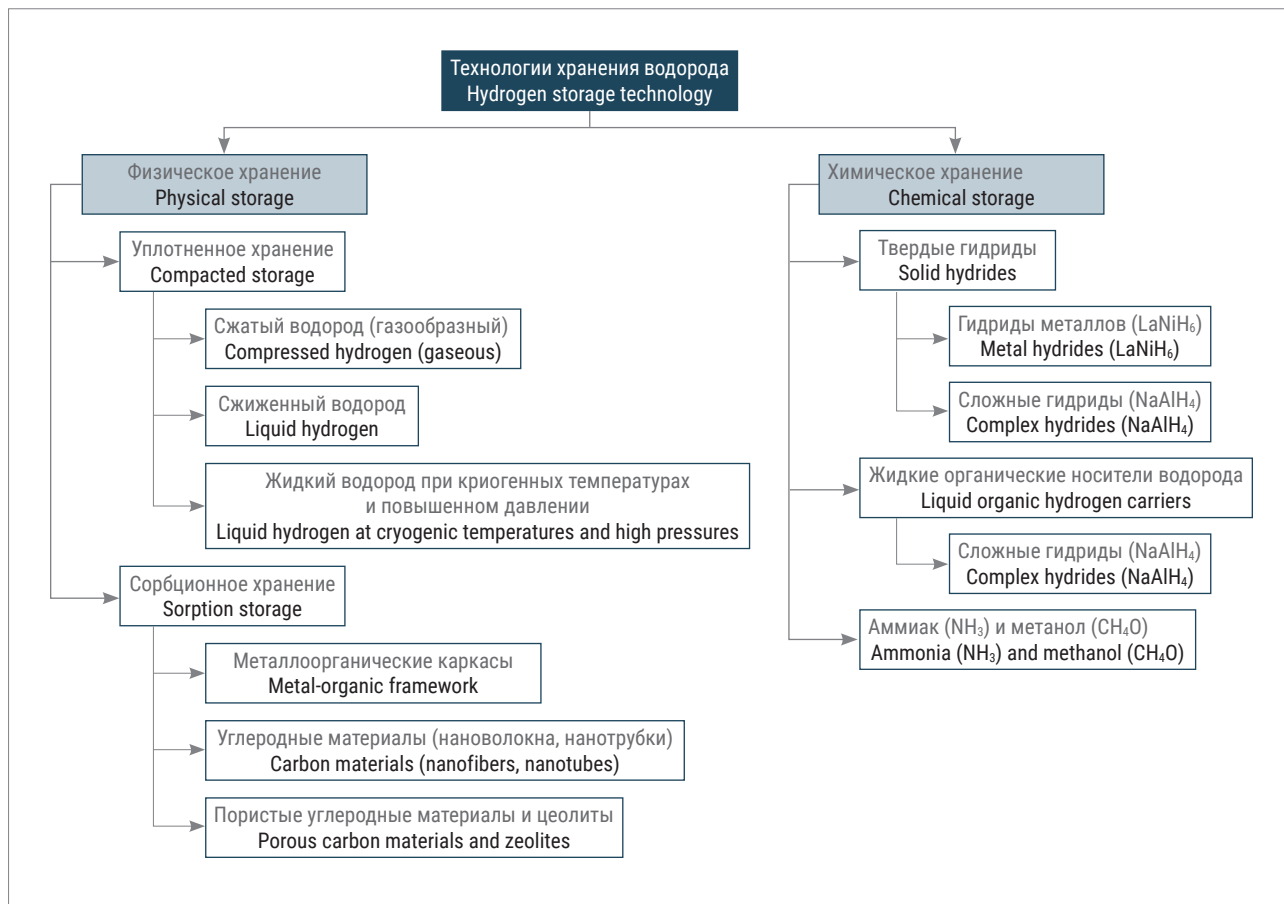


Рис. 1. Ключевые технологии хранения водорода
 Fig. 1. Key hydrogen storage technologies

состояниях, сводятся к необходимости выдерживать нагрузки и давления, возникающие при нормальной эксплуатации, и быть невосприимчивыми ко всем видам водородного охрупчивания и растрескивания.

Одна из ключевых задач в рамках создания водородной энергетики – решение проблемы хранения и транспортировки водорода на большие расстояния. Водный транспорт традиционно представляет собой один из наиболее востребованных способов перемещения грузов на значительные расстояния. По этой причине среди ключевых задач – исследование вопроса хранения водорода на борту судна.

В соответствии с общепринятой в мире классификацией различают физические, физико-химические и химические способы хранения водорода (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 (сотни атмосфер) или на его глубокое охлаждение ниже критической температуры ($-239,95\text{ }^{\circ}\text{C}$). Отличительная особенность физических систем – отсутствие взаимодействия между водородом и материалом (устройством) среды хранения. В настоящее время данные системы технически наиболее организованы.

Физико-химические и химические методы хранения и выделения водорода основаны на его способности к обратимому взаимодействию с материалом. Поскольку интерес к данным способам повышения плотности водорода возник сравнительно

недавно, в настоящее время все подобные системы находятся в стадии разработки.

Для оценки эффективности хранения и морской транспортировки 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 – отношение массы хранимого водорода к массе всего хранилища. Из всех рассмотренных технологий только жидкий органический носитель (ЛОHC), аммиак и метанол позволяют хранить водород при атмосферном давлении, в то время как доминирующие в настоящее время подходы к его хранению в газообразном и жидком виде требуют значительно более высокого рабочего давления. Кроме того, объемная

плотность водорода в ЛОНС, аммиаке и метаноле значительно выше, чем в газовых системах при стандартном промышленном диапазоне давлений.

Таким образом, наилучшими формами хранения и транспортировки с точки зрения емкостного критерия являются (от лучшего к худшему) аммиак, метанол, ЛОНС и сжиженный водород (LH₂).

В настоящее время самая большая проблема при развитии водородной энергетики состоит в необходимости соблюдения требований по обеспечению безопасности производства, хранения и транспортировки водорода и связанных с этим высоких финансовых затрат на реализацию проектов.

Для создания экономически эффективной системы доставки водорода потребителю нужны две составляющие:

- получение больших объемов водорода из недорогого сырья или использование недорогой технологии получения;
- наличие эффективной транспортно-логистической системы доставки водорода потребителю.

С учетом двух указанных требований ассоциацией HySTRA (CO₂-free Hydrogen Energy Supply-chain Technology Research Association) была реализована пилотная цепочка поставок водорода, производимого из бурого угля, из Австралии в Японию. Водород доставляется автотранспортом в порт Гастингс (Австралия) и охлаждается до температуры -253 °С. Дальнейшая перевозка в Японию, в порт Кобе, на большое расстояние осуществляется в виде LH₂ [9].

Используя существующие технологии строительства морских судов для перевозки СПГ, а также наземной транспортировки и хранения LH₂, японская компания Kawasaki Heavy Industries разработала новую криогенную



Рис. 2. Грузовой танк газовоза для транспортировки сжиженного водорода Suiso Frontier [8]

Fig. 2. Cargo tank of Suiso Frontier liquid hydrogen carrier [8]

систему хранения груза под давлением, специально предназначенную для транспортировки LH₂ морским судном. Основной целью проекта стало создание технологии для безопасной и эффективной транспортировки больших объемов водорода.

В декабре 2019 г. первое и пока единственное в мире судно для перевозки LH₂ спустили на воду, в марте 2020 г. на него установили танки для хранения водорода, а в декабре 2020 г. оно было готово к эксплуатации. 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. Вместимость грузовых танков всего 1250 м³, что составляет около 75 т LH₂.

Особый интерес представляет грузовая система судна (рис. 2), выполненная в виде цилиндрических танков типа С (по классификации Международной морской организации), оборудованных двустенной вакуумной криоизоляцией, что делает их, по сути, сосуда́ми Дьюара, способными работать под избыточным давлением [10]. Технология обеспечения высоких теплоизоляционных характеристик основана на опы-

те Kawasaki Heavy Industries, Ltd. в области морских перевозок СПГ, а также на более чем 30-летней истории работы с LH₂, используемым в ракетных двигателях.

Водород в качестве топлива на судне не применяется, поэтому судовая энергетическая установка представляет собой три дизель-генератора Daihatsu 6DE-23 суммарной мощностью 3600 кВт, приводящих в движение два электрических гребных мотора суммарной мощностью 2720 кВт, которые обеспечивают вращение одного винта фиксированного шага, что позволяет судну развивать заявленную скорость.

Примером альтернативной цепочки поставки водорода является проект AHEAD¹, в рамках которого используется органо-химический гидридный метод его транспортировки и хранения (рис. 3).

Компании Chiyoda, Mitsubishi Motors, Mitsui & Co. и Nippon Yusen Kabushiki Kaisha начали реализацию проекта еще в 2015 г. Они сформировали общее научно-исследовательское подразделение AHEAD, которое построило завод по гидрогенизации (гидрированию твердого вещества для связывания водорода) в Брунее

¹ Advanced Hydrogen Energy chain Association for technology Development – Ассоциация технологического развития водородной энергетики.

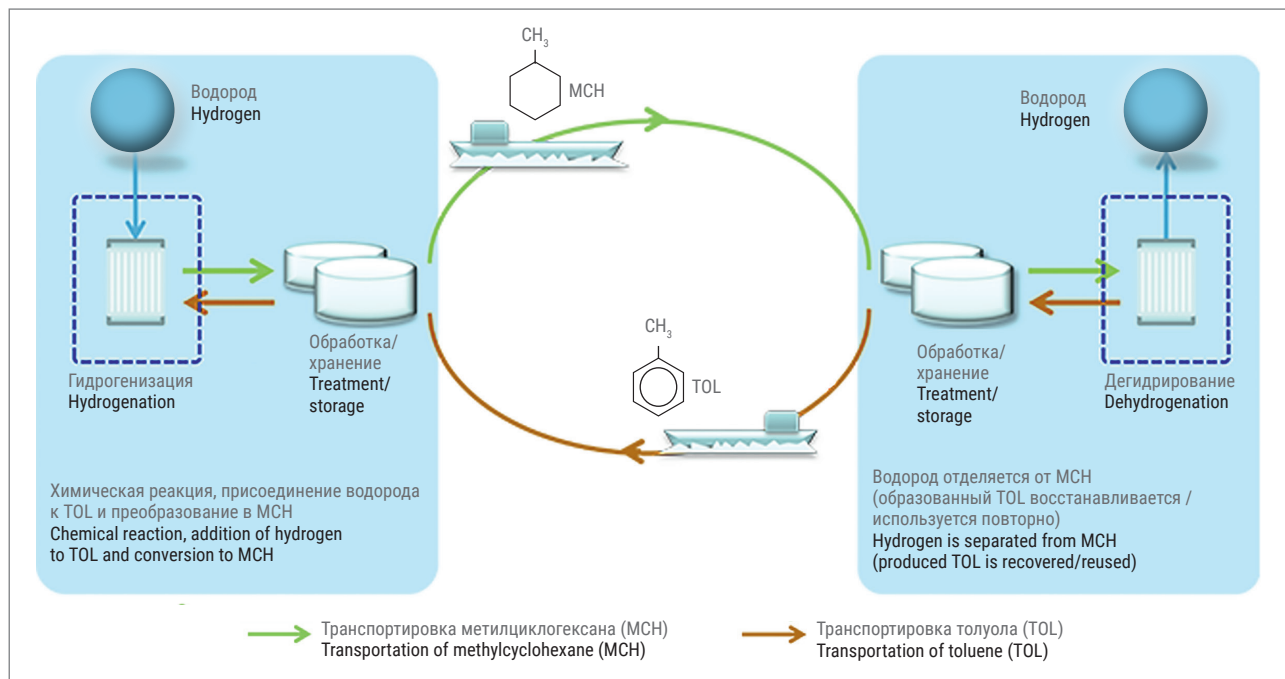
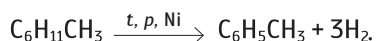


Рис. 3. Концептуальная схема цепочки поставки водорода по проекту AHEAD
Fig. 3. Conceptual hydrogen supply chain for the AHEAD project

и установку по дегидрогенизации в Японии [11].

В рамках данного проекта водород производится методом паровой конверсии метана, поставляемого в Бруней газозамами в сжиженном виде. Затем его связывают с толуолом, получая метилциклогексен, который в нормальных условиях представляет собой жидкость. Последнюю можно хранить и перевозить в цистернах и танкерах. В данном случае метилциклогексен выступает в роли ЛОНС.

Метилциклогексен – бесцветная жидкость с температурой кипения 101 °С и плавления –126,3 °С, с плотностью 0,77 г/см³. В присутствии катализаторов он дегидрируется с образованием толуола и водорода:



Метилциклогексен доставляют в Токийский залив, где на НПЗ «Кэйхин» компании Тао Oil производится его дегидрогенизация. Далее водород смешивается с газообразными продуктами нефтепереработки и поступает

в газовые турбины ТЭС «Мидзуэ», находящейся на территории НПЗ. Толуол возвращается в Бруней для повторного использования.

В отличие от перевозки в сжатом или сжиженном состоянии в рамках проекта AHEAD водород в виде ЛОНС транспортируется при нормальных температуре и давлении с использованием инфраструктуры, давно созданной для доставки нефти и нефтепродуктов. Поставки метилциклогексана в 2020 г. осуществлялись с помощью танк-контейнеров (цистерн), но уже в феврале 2022 г. танкер-химовоз CRANE URANUS доставил в Японию первую судовую партию водорода в виде ЛОНС.

Из вариантов транспортировки водорода в форме метанола и аммиака более предпочтительным с экологической точки зрения выглядит последний.

В конце 2024 г. французская компания Air Liquide получила грант в размере 110 млн евро от Европейского инновационного фонда на проект ENHANCE в порту Антверпен-Брюгге (Бельгия). Он направлен на производство и распространение низкоуглеродного

и возобновляемого водорода, полученного из аммиака. В рамках проекта Air Liquide намерена построить первую в своем роде промышленную установку крекинга NH₃ на возобновляемых источниках энергии и инновационную установку для сжижения водорода.

Аммиак приобретает жидкую форму при более высокой (–33 °С), чем водород (–253 °С), температуре, отличаясь при этом меньшей взрывоопасностью. Портовая инфраструктура и морские суда для транспортировки NH₃ уже существуют, что в значительной степени упрощает и удешевляет процесс создания новых логистических маршрутов. По мнению участников проекта, инновация может уменьшить потребность в строительстве дорогостоящих морских газовозов.

Подводя итог предварительного сравнения вариантов морской транспортировки водорода, можно выделить основные преимущества и недостатки по нескольким направлениям (табл. 1) [12]. Первый и достаточно важный фактор – это плотность хранения

Таблица 1. Преимущества и недостатки вариантов транспортировки водорода
 Table 1. Advantages and disadvantages of hydrogen transportation options

Основные характеристики Key characteristics		NH ₃	LH ₂	LOHC (бензотолуол) (benzotoluene)
Плотность хранения Storage density	Объем, кг H ₂ /м ³ носителя Volume, kg H ₂ /m ³ of carrier	121,2	70,8	55,2
Потребность в энергии Power demand	Конверсия, МВт·ч/т H ₂ Conversion, MW·h/t H ₂	5,75	12,00	0,50
	Реконверсия, МВт·ч/т H ₂ Reconversion, MW·h/t H ₂	11,20	0,60	15,00
	Конверсия Conversion	■ ■ ■	■ ■ ■	■
	Хранение Storage	■ ■ ■	■ ■ ■	■ ■ ■
	Перевозка Transportation	■ ■ ■	■	■ ■ ■
	Реконверсия Reconversion	■	■ ■ ■	■ ■
Факты применения технологии Actual technology applications	Преимущества Advantages	Высокая емкость хранения. Развитая инфраструктура, за исключением процесса крекинга High storage capacity. Well-developed infrastructure except for the cracking process	Не требует преобразования. Водород высокой чистоты Does not require conversion. High purity hydrogen	Легко хранить и транспортировать (нефтепродукты). Использование существующей инфраструктуры Easy to store and transport (petroleum products). Use of the existing infrastructure
	Недостатки Disadvantages	Необходима дополнительная ступень очистки. Высокие энергозатраты на процесс крекинга (неразвитая технология) Requires an additional purification stage. High energy consumption for the cracking process (undeveloped technology)	Испарение по всей цепочке перевозки. Высокие энергозатраты на сжижение. Сложность хранения и транспортировки Evaporation along the entire transportation chain. High power consumption for liquefaction. Hard to store and transport	Ограниченное число циклов использования носителя. Высокие энергозатраты на дегидрирование Limited number of carrier usage cycles. High power consumption for dehydrogenation
	Безопасность Safety	Острая токсичность, огнеопасен, взрывоопасен при нагревании, токсичен для водной флоры и фауны Acute toxicity, flammable, explosive when heated, toxic to aquatic flora and fauna	Быстро воспламеняется без видимого пламени, может образовывать взрывоопасные смеси с воздухом Ignites quickly without visible flame and can form explosive mixtures with air	Низкая токсичность, невзрывоопасен, не опасен для водной среды Low toxicity, non-explosive, not dangerous for the aquatic environment

Примечание. LH₂ – сжиженный водород; LOHC – жидкий органический носитель водорода; ■ ■ ■ – проверенная коммерческая технология; ■ ■ – действующий прототип; ■ – технология проверена или находится в стадии разработки.
 Note. LH₂ – liquid hydrogen; LOHC – liquid organic hydrogen carrier; ■ ■ ■ – proven commercial off-the-shelf technology; ■ ■ – current prototype; ■ – technology has been proven or is under development.



носителя. Здесь преимущество имеет аммиак, а перевозка с использованием LОНС менее эффективна. Вторым фактором выступает потребление энергии на всех стадиях транспортировки. В целом все варианты достаточно энергозатратны, отличаются лишь стадии преобразования носителя. Если рассматривать морскую транспортировку водорода в ближайшей перспективе (до трех лет), то важна зрелость используемых технологий. Следует отметить, что все этапы указанных вариантов перевозки имеют апробированные технологии или находятся в стадии разработки, т. е. существуют технически реализуемые решения. Основные проблемы заключаются в масштабировании процессов.

СРАВНИТЕЛЬНОЕ ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ВАРИАНТОВ ТРАНСПОРТИРОВКИ ВОДОРОДА

Реализация крупных инвестиционных проектов (освоение новых месторождений природных ресурсов, выход на новые рынки сбыта готовой продукции и т. д.) проходит несколько этапов разработки, каждый из которых характеризуется различной точностью расчетов. Задачу определения наиболее эффективного способа морской транспортировки водорода можно отнести к начальному этапу – разработки концепции, что соответствует по составу работ технико-экономическому обоснованию (ТЭО). Исходными данными для выполнения ТЭО, как правило, выступают достаточно общее описание проекта и краткие требования к процессу перевозки груза морскими судами.

На водном транспорте при обосновании проектов традиционно применяют методы аналитического или имитационного математического моделирования. В случае использования малого числа объектов и детерминированных данных используют статические аналитические модели (разработанные,

например, в MS Excel). В некоторых случаях аналитическая модель не способна учесть факторы, влияющие на технологический процесс работы линии, а именно: динамику внешних условий и внутренних параметров объектов транспортной системы, их пространственное изменение и взаимосвязь; экстремальные условия и нестандартные ситуации, т. е. наличие определенного числа стохастических параметров [13]. В этом случае используются методы имитационного моделирования, которые позволяют имитировать функционирование транспортной системы с учетом логической и временной последовательности протекания всех процессов.

Основные подходы к формированию транспортно-логистических схем (ТЛС) морской транспортировки и выполнению ТЭО изложены в стандарте АО «ЦНИИМФ» СТО ЯКУТ.23.01–2025 [14]. Как правило, ТЭО морской транспортной системы состоит из двух основных разделов работ.

Первый – разработка логистических схем – включает:

- описание основных параметров формирования логистической схемы;
- характеристику портовой инфраструктуры;
- анализ условий плавания;
- анализ рынка транспортного и вспомогательного флота;
- разработку основных технико-эксплуатационных требований к судам;
- анализ фрахтового рынка судов.

Второй – разработка математической модели функционирования транспортной системы – включает:

- моделирование работы флота и расчет эксплуатационных показателей;
- оценку стоимости расчетных судов;
- расчет операционных и капитальных затрат;
- оценку экономической эффективности логистических схем.

На первом этапе разработки ТЭО вариантов морской транспортировки водорода были проанализированы и определены следующие взаимосвязанные базовые элементы:

- грузы;
- порты отправления (погрузки) и назначения (выгрузки);
- расчетные суда;
- маршруты транспортировки грузов.

Каждый из перечисленных элементов накладывает ограничения на транспортно-логистическую систему: груз – на типоразмер судна и способ его перевозки, порты – на маршруты транспортировки, условия плавания – на суда.

Формирование требований к расчетным типам судов для перевозки водорода и его производных выполнено на основании анализа:

- существующих технологий и перспективных способов морской транспортировки на базе изучения российских и зарубежных научных периодических изданий, аналитических отчетов крупнейших добывающих компаний, международных классификационных обществ и консалтинговых организаций;
- требований к материалам и оборудованию для транспортировки, хранения/погрузки водорода и его производных, указанных в действующих российских стандартах, технических условиях и международных нормативных документах;
- уже имеющихся проектов судов для перевозки водорода и концептуальных проектов российских и зарубежных компаний;
- имеющейся российской и международной нормативной базы в области как проектирования и строительства судов, так и их безопасной эксплуатации: правила и требования классификационных обществ, международные кодексы, рекомендации международных морских организаций.

Таблица 2. Основные технические характеристики расчетных судов для перевозки водорода в жидком виде
Table 2. Key specifications of design vessels for the transportation of hydrogen in liquid form

Характеристика Description	Судно Vessel			
	НГВ-75 LH2-75	НГВ-75-13 LH2-75-13	НГВ-130 LH2-130	НГВ-130-13 LH2-130-13
Ледовый класс Ice class	Нет No	Ice 3	Нет No	Ice 3
Грузовая система Cargo system	Тип В (сферические) Type B (spherical)			
Водоизмещение, т Displacement, t	62 591	62 855	112 902	113 237
Грузоподъемность по водороду, т Hydrogen load capacity, t	5310	5310	9204	9204
Грузовместимость, тыс. м ³ Cargo capacity, thousand m ³	75	75	130	130
Наибольшая длина, м Overall length, m	220	220	274	274
Ширина, м Breadth, m	35,0	35,0	47,2	47,2
Высота борта, м Depth, m	22,5	22,5	26,5	26,5
Проектная осадка, м Design draft, m	10,00	10,04	11,80	11,83
Суммарная мощность электроустановки, кВт Total electrical installation capacity, kW	16 219	16 252	18 822	18 850
Максимальная скорость, уз Maximum speed, kn	16,3	16,3	16,3	16,3

В рамках представленного исследования выполнено концептуальное проектирование и разработаны требования к газозовам, предназначенным для транспортировки LH₂ (табл. 2). Параметры газозовов СУГ для транспортировки аммиака и танкеров-продуктозов для транспортировки LОНС были определены на основании аналогов.

Маркетинговое исследование существующих и перспективных регионов производства и потребления водорода позволило определить расчетные порты погрузки (Восточный, Тамань, Усть-Луга и Мурманск) и выгрузки (Тяньцзинь, Гуанчжоу, Роттердам, Картахена) продукции. Основные критерии определения перспективных портов – наличие действующей перевалки жидких химических грузов и сжиженных газов, а также возможности для развития существующих и строительства новых терминалов с учетом территориального планирования.

По результатам указанных аналитических исследований было сформировано 132 ТЛС для транспортировки водорода в форме LH₂, NH₃ и LОНС маршрутами разной протяженности, в том числе через Суэцкий канал, мыс Доброй Надежды и по Северному морскому пути. Ввиду имеющихся технико-эксплуатационных ограничений в расчетах принято, что перевозка из Мурманска в восточном направлении по Северному морскому пути осуществляется сезонно.

Для оценки эксплуатационных и капитальных затрат, выполнения сравнительного анализа стоимости доставки водорода в различных формах (LH₂, NH₃, LОНС) в среде MS Excel была разработана расчетная эксплуатационно-экономическая модель (далее – модель), учитывающая известные аналитические зависимости между элементами транспортной системы и их технико-эксплуатационными характеристиками.

С функциональной точки зрения модель включает в себя три модуля, каждый из которых состоит из нескольких листов (рис. 4):

- модуль исходных данных, входных параметров и настройки расчетов;
- модуль расчета эксплуатационно-экономических показателей работы флота;
- модуль выходных данных и результирующих значений.

Основным объектом-потомком в модели выступает ТЛС, которая представляет собой уникальный идентификатор, определяющий набор и взаимосвязь элементов транспортной системы – объектов-родителей («суда», «порты», «груз», «маршрут» и др.). В модели можно выполнить расчеты как по заранее сформированным схемам, так и по ТЛС, созданным пользователем на листе «Настройка и запуск расчета» (рис. 5).



Модуль Module	Последовательность действий Sequence of actions	Наименование листа Sheet title
Исходные данные, входные параметры и настройка расчетов Basic data, inputs, and calculation settings	1. Ввод/выбор всех элементов транспортно-логистической схемы и условий расчета 1. Enter/select all elements of the logistics scheme and calculation conditions	 Настройка и запуск расчета Setup and start of calculation
	2. Работа со справочниками 2. Consult reference books	 ИД_Общее, ИД_Порты, ИД_Суда, ИД_Протяженности ID_General, ID_Ports, ID_Vessels, ID_Lengths
	3. Формирование базовой единицы расчета – логистической схемы 3. Create the basic calculation unit – the logistic scheme	 ЛогистСхема LogisticScheme
Расчет эксплуатационно-экономических показателей работы флота Calculation of fleet operational and economic performance	4. Расчет постоянных затрат 4. Calculate fixed costs	 ШтатРасп, ПостЗатраты_Флот StaffSchedule, FixedCosts_Fleet
	5. Расчет эксплуатационных показателей 5. Calculate operating performance	 Эксплуатация, Стояночное время Operation, Lay Time
	6. Расчет переменных затрат 6. Calculate variable costs	 Топливо, УС и квоты, ПортСб, ВспомогФлот Fuel, Carbon Footprint and Quotas, Ports, SupportFleet
	7. Расчет экономических показателей 7. Calculate economic performance	 Экономика Economics
Выходные данные и результирующие значения Output data and resulting values	8. Формирование результатов расчета 8. Produce calculation results	 Прямая_таблица Direct_Table
	9. Аналитика результатов на сводных листах 9. Analyze results on summary sheets	 Свод_ЛС, Свод_груз Summary_LS, Summary_Cargo

Рис. 4. Структура и логика работы модели
 Fig. 4. Model structure and logic

При формировании ТЛС можно создавать новые объекты – порты и суда, заполняя необходимые данные в справочниках. Помимо работы с пользовательскими ТЛС, функционал модели позволяет редактировать данные в справочниках. Дополнительно доступна корректировка условий расчета, например курсов валют, доли собственных и заемных средств, ставки кредитования и др. Все исходные данные по объектам модели хранятся в справочниках на отдельных листах.

Расчет эксплуатационных показателей работы флота включает определение:

- эксплуатационного периода;
- продолжительности рейс-оборота;

- провозной способности судна;
- потребности во флоте для перевозки заданного объема груза.

Формирование бюджета постоянных расходов по судам предусматривает расчет затрат на содержание экипажа, страхование судов, менеджмент, амортизационные отчисления (инвестиционные расходы). Помимо этого, в бюджете учитываются расходы на техническую эксплуатацию судов (материалы и снабжение, смазочные масла, текущий ремонт и обслуживание, докование и промежуточные ремонты).

Формирование бюджета переменных расходов по судам предусматривает расчет затрат на топливо, оплату сборов и услуг в портах, сборов за прохождение

судоходных каналов, покупку квот на выбросы парниковых газов.

Расчет экономических показателей работы судов для ТЛС, включая удельную себестоимость перевозки 1 кг водорода, выполняется на базе эксплуатационных расходов путем агрегирования информации, входящей в модуль расчета эксплуатационно-экономических показателей работы флота.

Модуль выходных данных состоит из сводных листов, которые для удобства анализа результатов вычислений содержат фильтры для вывода необходимой пользователю информации.

Эксплуатационные и экономические результаты математического моделирования работы различных типов судов по перевозке водорода представлены в табл. 3.

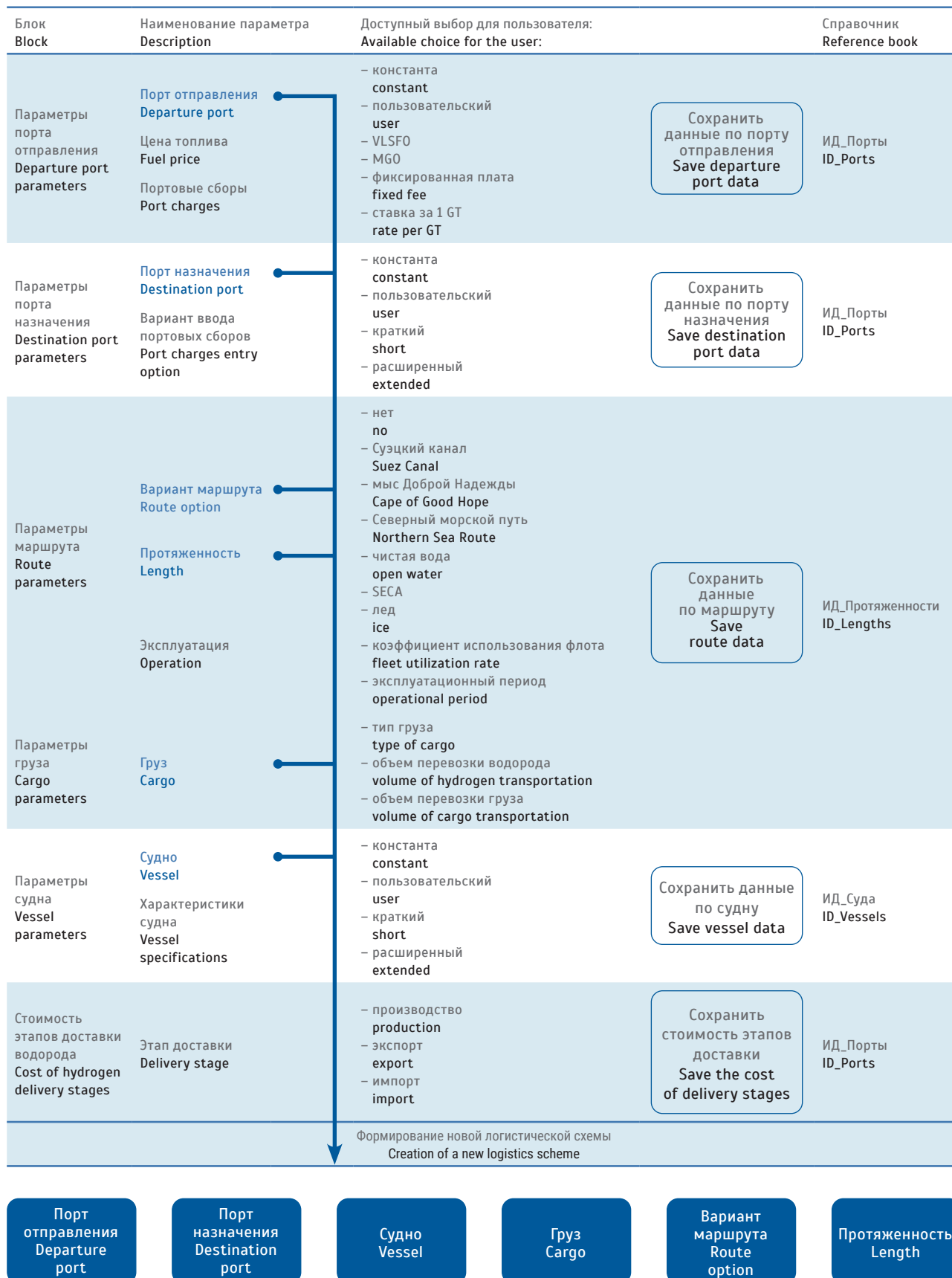


Рис. 5. Порядок формирования новой транспортно-логистической схемы
 Fig. 5. Procedure for creating a new logistics scheme



Таблица 3. Основные эксплуатационно-экономические показатели работы судов на оптимальных транспортно-логистических схемах

Table 3. Key performance indicators of vessels operating according to optimal logistics schemes

Порт отправления Departure port	Порт назначения Destination port	Протяженность, мили Length, miles	Груз Cargo	Судно Vessel	Потребность во флоте, ед. Fleet demand, units	CAPEX, млн долл. США CAPEX, million USD	Себестоимость перевозки, долл. США/кг Cost of transportation, USD/kg
Объем перевозок H ₂ – 1,0 млн т Volume of H ₂ shipments – 1 million t							
Мурманск Murmansk	Нидерланды (Роттердам) Netherlands (Rotterdam)	1651	LH ₂	HGB-130 LH2-130	4	1090,6	0,60
				HGB-75 LH2-75	6	942,1	0,68
			NH ₃	HГ-80 LPG-80	5	559,4	0,46
				HГ-40 LPG-40	8	517,3	0,54
			LOHC	HO-70 Tanker-70	10	556,4	0,58
				HO-40 Tanker-40	13	622,2	0,79
Усть-Луга Ust-Luga	Нидерланды (Роттердам) Netherlands (Rotterdam)	1227	LH ₂	HGB-130-I3 LH2-130-I3	3	875,2	0,49
				HGB-75-I3 LH2-75-I3	5	840,1	0,58
			NH ₃	HГ-80-I3 LPG-80-I3	4	478,8	0,39
				HГ-40-I3 LPG-40-I3	7	484,3	0,47
			LOHC	HO-70-I3 Tanker-70-I3	9	535,8	0,51
				HO-40-I3 Tanker-40-I3	11	563,3	0,68
Тамань Taman	Испания (Картахена) Spain (Cartagena)	2011	LH ₂	HGB-130 LH2-130	4	1090,6	0,69
				HGB-75 LH2-75	7	1099,1	0,83
			NH ₃	HГ-80 LPG-80	5	559,4	0,54
				HГ-40 LPG-40	9	581,9	0,66
			LOHC	HO-70 Tanker-70	12	667,7	0,70
				HO-40 Tanker-40	15	717,9	0,97
Объем перевозок H ₂ – 1,5 млн т Volume of H ₂ shipments – 1,5 million t							
Восточный Vostochny	Китай (Тяньцзинь) China (Tianjin)	1222	LH ₂	HGB-130 LH2-130	4	1090,6	0,42
				HGB-75 LH2-75	7	1099,1	0,50
			NH ₃	HГ-80 LPG-80	6	671,3	0,34
				HГ-40 LPG-40	9	582,0	0,40
			LOHC	HO-70 Tanker-70	13	723,3	0,44
				HO-40 Tanker-40	15	717,9	0,59

Примечание. LH₂ – сжиженный водород; LOHC – жидкий органический носитель водорода. Зеленым цветом для каждого маршрута отмечены минимальные значения соответствующего показателя.

Note. LH₂ – liquid hydrogen; LOHC – liquid organic hydrogen carrier. The minimum values of the corresponding indicator for each route are marked in green.

По результатам оценки стоимости морской транспортировки водорода можно сделать следующие краткие выводы:

- несмотря на то что при перевозке LH₂ потребность в судах минимальна в сравнении с перевозкой NH₃ и LOHC, за счет высокой стоимости уникального флота газозовов LH₂ транспортировка сжиженного водорода требует максимальных капитальных вложений;

- по критерию минимальной себестоимости организация перевозки аммиака наиболее экономически эффективна в сравнении с другими формами транспортировки;

- экономически целесообразнее организовывать транспортировку грузов в ближайший по расположению порт;

- для всех форм водорода наименьшая себестоимость перевозки достигается при транспортировке груза судном большей вместимости;

- себестоимость перевозки грузов маршрутом через мыс Доброй Надежды в среднем на 40 % выше, чем через Суэцкий канал;

- наиболее оптимальна ТЛС транспортировки водорода в форме аммиака газозовами СУГ вместимостью 80 тыс. м³ из порта Восточный в порт Тяньцзинь.

Следует отметить, что морская транспортировка рассматриваемых типов груза – лишь одно из звеньев большой цепочки поставок «готовой» продукции потребителям (табл. 4). Для приведения всех эксплуатационно-экономических показателей к единой базе расчета под готовой продукцией в данном исследовании понимается именно водород.

Оценка стоимости доставки водорода от мест производства до приемных терминалов в зависимости от формы его транспортировки включает стоимость всех этапов, указанных в табл. 4. Как показали расчеты, в случае перевозки груза в ближайшие по расположению порты вне зависимости от типоразмера судна и формы водорода доля морской транспортировки в конечной стоимости доставки составляет около 20 %. Однако при организации поставок на большие расстояния

из портов европейской части России в Китай доля морской транспортировки значительно увеличивается и составляет 50–60 % от конечной стоимости доставки.

На рис. 6 в качестве примера приведены оценка и структура средней стоимости доставки водорода в форме аммиака из порта Мурманск, аккумулированная по расчетным судам и укрупненным рынкам сбыта: Европа и Китай. В свою очередь, поставки в Китай подразделяются по вариантам маршрута: через Суэцкий канал, мыс Доброй Надежды и Северный морской путь.

Минимальная стоимость доставки водорода достигается при его транспортировке из порта Восточный в порт Тяньцзинь судами большей вместимости (рис. 7).

ВЫВОДЫ

Доставка водорода в виде LH₂ и LOHC значительно дороже, чем в форме аммиака, ввиду высокой стоимости ее отдельных этапов. Таким образом, наиболее эффективной и быстрокупаемой формой морской транспортировки

Таблица 4. Технологический цикл доставки водорода в зависимости от формы его морской транспортировки
 Table 4. Hydrogen delivery cycle depending on the hydrogen form for maritime transportation

Этап Stage		Форма транспортировки Form for transportation			
		LOHC	LH ₂	NH ₃	
Порт отправления Departure port	Производство Production	Производство H ₂ H ₂ production	Исходное состояние – H ₂ Initial condition – H ₂		
		Преобразование в форму для транспортировки Conversion to a form for transportation	Сжижение Liquefaction	Синтез Synthesis	Гидрирование Hydrogenation
	Экспорт Export	Хранение и перевалка Storage and transshipment	LH ₂	NH ₃	LOHC
Перевозка Transportation	Морская транспортировка Sea transportation		Газовоз LH ₂ LH ₂ carrier	Газовоз СУГ LPG carrier	Танкер Tanker
Порт назначения Destination port	Импорт Import	Перевалка и хранение Transshipment and storage	LH ₂	NH ₃	LOHC
		Преобразование в H ₂ Conversion to H ₂	Регазификация Regasification	Каталитический крекинг Catalytic cracking	Дегидрирование Dehydrogenation

Примечание. LH₂ – сжиженный водород; LOHC – жидкий органический носитель водорода.
 Note. LH₂ – liquid hydrogen; LOHC – liquid organic hydrogen carrier.

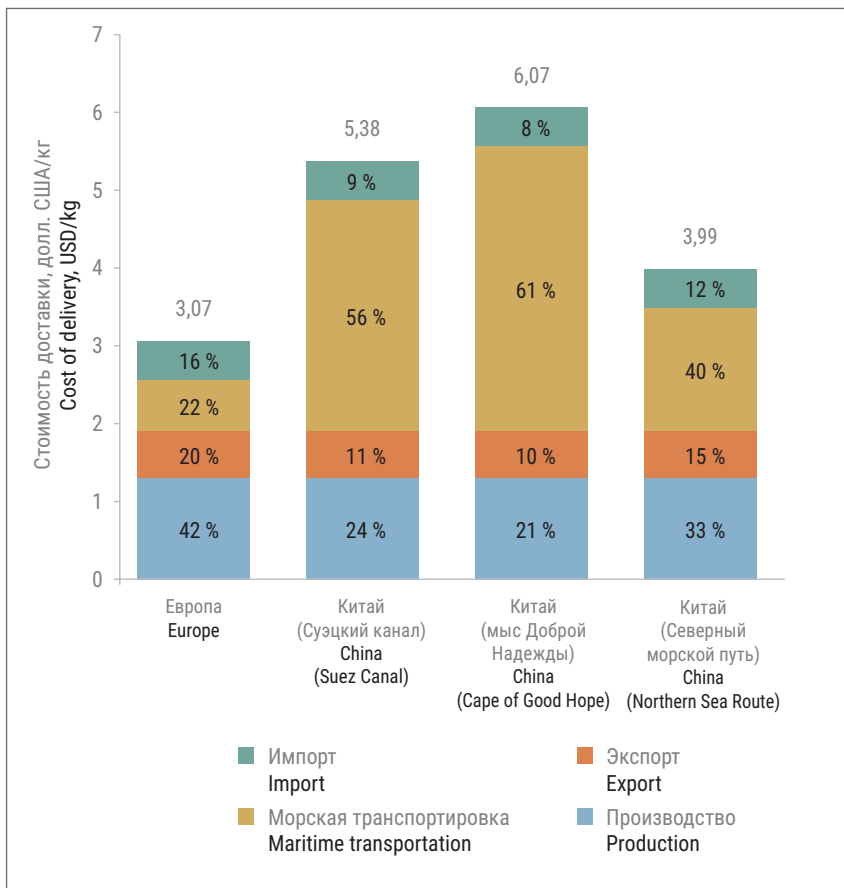


Рис. 6. Структура средней стоимости доставки водорода в форме NH₃ из порта Мурманск в порты Европы и Китая
 Fig. 6. Breakdown of average cost of delivery of hydrogen as NH₃ from port of Murmansk to ports of Europe and China

водорода в настоящее время является NH₃.

Минимальная стоимость доставки достигается при перевозке водорода в форме аммиака в ближайшие по расположению порты и в среднем составляет для европейских рынков 3,04–3,24 долл. США/кг, для китайского – 2,84 долл. США/кг. При сезонной перевозке водорода в форме NH₃ по Северному морскому пути в Китай этот показатель достигает 3,99 долл. США/кг.

Преимущество LH₂ заключается в сравнительно небольшой потребности в судах для перевозки заданного объема груза. В случае отсутствия ограничений на габариты судов в терминалах транспортировка водорода в форме LOHC может быть осуществлена крупнотоннажным танкерным флотом, доступным на фрахтовом рынке.

Таким образом, на данном этапе развития технологий наиболее экономически эффективная форма доставки водорода – аммиак.

Кроме того, необходимо отметить, что использование математического инструментария при

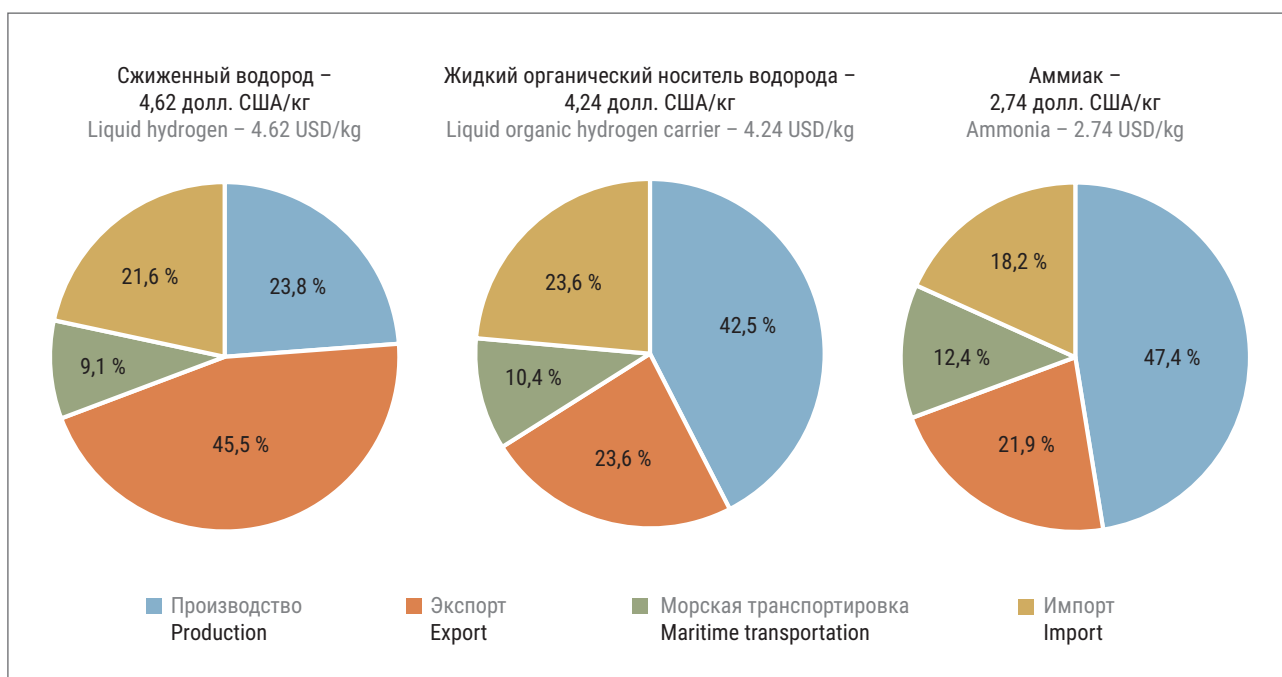


Рис. 7. Структура минимальной стоимости доставки водорода по формам транспортировки
 Fig. 7. Breakdown of minimum cost of hydrogen delivery by forms of transportation

моделировании работы транспортных систем позволяет оперативно выполнить оценку большого количества вариантов потенциальных бизнес-кейсов. Точность оценки зависит от перечня и детализации используемых в расчетах ис-

ходных данных. Математическая модель не только представляет собой гибкий инструмент, адаптированный к работе пользователя, но и открывает большие возможности по аналитике полученных результатов.

Проиллюстрированный в статье подход достаточно универсален и может успешно применяться при обосновании технической и экономической целесообразности морской транспортировки широкой номенклатуры грузов. ■

ЛИТЕРАТУРА

- Liebreich M. Liebreich: Clean hydrogen's missing trillions // BloombergNEF: сайт. URL: <https://about.bnef.com/blog/liebreich-clean-hydrogens-missing-trillions> (дата обращения: 12.11.2025).
- Российская Федерация. Правительство. Энергетическая стратегия Российской Федерации на период до 2035 года: распоряжение Правительства Российской Федерации от 09.06.2020 № 1523-р // Правительство Российской Федерации: офиц. сайт. URL: <http://government.ru/docs/all/128340/> (дата обращения: 12.11.2025).
- Дорохова И. Ставка на технологии. Как изменилась российская государственная политика в области водорода // Вестник Атомпрома. 2023. № 7. С. 15–17.
- Российская Федерация. Правительство. Концепция развития водородной энергетики в Российской Федерации: распоряжение Правительства Российской Федерации от 05.08.2021 № 2162-р // Правительство Российской Федерации: офиц. сайт. URL: <http://static.government.ru/media/files/5JFns1CDAKqYkZ0mnRADAw2Nqcvsexl.pdf> (дата обращения: 12.11.2025).
- Водородная энергетика 2023: тренды и перспективы рынка чистой энергетики // АО «ДЕЛОВОЙ ПРОФИЛЬ»: офиц. сайт. URL: <https://delprof.ru/press-center/open-analytics/vodorodnaya-energetika-2023-trendy-i-perspektivy-rynka-chistoy-energetiki/> (дата обращения: 12.11.2025).
- Атлас российских проектов по производству низкоуглеродного и безуглеродного водорода и аммиака // Министерство промышленности и торговли Российской Федерации: офиц. сайт. URL: <https://minpromtorg.gov.ru/storage/797ced43-043d-4b4e-b72b-3d36984adbct/documents/663f0df0-8439-4152-a8ea-2c4d0d36ffe4/008cee19-8ce0-4107-9013-74288ef21298.pdf> (дата обращения: 12.11.2025).
- ГОСТ Р 53679–2009. Нефтяная и газовая промышленность. Материалы для применения в средах, содержащих сероводород, при добыче нефти и газа. Часть 1. Общие принципы выбора материалов, стойкие к растрескиванию // Кодекс: электрон. фонд правовых и норматив.-техн. док. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200083328> (дата обращения: 12.11.2025).
- ГОСТ Р 53678–2009. Нефтяная и газовая промышленность. Материалы для применения в средах, содержащих сероводород, при добыче нефти и газа. Часть 2. Углеродистые и низколегированные стали, стойкие к растрескиванию, и применение чугунов // Кодекс: электрон. фонд правовых и норматив.-техн. док. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200083327> (дата обращения: 12.11.2025).
- Hydrogen energy supply chain pilot project between Australia and Japan // HySTRA: офиц. сайт. URL: <https://www.hystra.or.jp/en/project/> (дата обращения: 12.11.2025).
- Танкер-газовоз Suiso Frontier отправился в Австралию за водородом // Neftegaz.RU: портал. URL: <https://neftegaz.ru/news/Suda-i-sudostroenie/718616-tanker-gazovoz-suiso-frontier-otpravilsya-v-avstraliyu-za-vodorodom/> (дата обращения: 12.11.2025).
- Advanced Hydrogen Energy chain Association for technology Development: офиц. сайт. URL: <https://www.ahead.or.jp/en/research.html> (дата обращения: 12.11.2025).
- Berger R. Hydrogen transportation. The key to unlocking the clean hydrogen economy // Roland Berger GmbH: офиц. сайт. URL: https://www.rolandberger.com/publications/publication_pdf/roland_berger_hydrogen_transport.pdf (дата обращения: 12.11.2025).
- Буянов А.С., Гончарова А.Н. Имитационное моделирование как средство планирования работы судна на линии // Логистика: современные тенденции развития: Материалы XVII Междунар. науч.-практ. конф. СПб.: ГУМРФ имени адмирала С.О. Макарова, 2018. С. 113–116. EDN: XZNHFP.
- СТО ЯКУТ.23.01–2025. Технико-экономическое обоснование проектирования, строительства и эксплуатации судов. Основные положения // АО «ЦНИИМФ»: офиц. сайт. URL: <https://cniimf.ru/> (дата обращения: 12.11.2025). Режим доступа: по особым условиям в локальной сети владельца.

REFERENCES

- Liebreich M. Liebreich: Clean hydrogen's missing trillions. Available from: <https://about.bnef.com/blog/liebreich-clean-hydrogens-missing-trillions> [Accessed: 12 November 2025].
- The Russian Government. Decree No. 1523-r dated 9 June 2020. The Energy Strategy of the Russian Federation to 2035. Available from: <http://government.ru/docs/all/128340/> [Accessed: 12 November 2025]. (In Russian)
- Dorokhova I. Focusing on technology: How Russian hydrogen policy has changed. *Bulletin of Atomprom* [Vestnik Atomproma]. 2023;(7): 15–17. (In Russian)
- The Russian Government. Decree No. 2162-r dated 5 August 2021. Concept of the development of hydrogen energy in the Russian Federation. Available from: <http://static.government.ru/media/files/5JFns1CDAKqYkZ0mnRADAw2Nqcvsexl.pdf> [Accessed: 12 November 2025]. (In Russian)
- JSC "DELOVOY PROFILE". Hydrogen energy 2023: Clean energy market trends and prospects. Available from: <https://delprof.ru/press-center/open-analytics/vodorodnaya-energetika-2023-trendy-i-perspektivy-rynka-chistoy-energetiki/> [Accessed: 12 November 2025]. (In Russian)
- Ministry of Industry and Trade of the Russian Federation. Atlas of Russian projects for the production of low-carbon and carbon-free hydrogen and ammonia. Available from: <https://minpromtorg.gov.ru/storage/797ced43-043d-4b4e-b72b-3d36984adbct/documents/663f0df0-8439-4152-a8ea-2c4d0d36ffe4/008cee19-8ce0-4107-9013-74288ef21298.pdf> [Accessed: 12 November 2025]. (In Russian)
- Federal Agency on Technical Regulating and Metrology (Rosstandart). GOST R 53679–2009 (state standard). Petroleum and natural gas industries. Materials for use in H₂S-containing environments in oil and gas production. Part 1. General principles for selection of cracking-resistant materials. Available from: <https://docs.cntd.ru/document/1200083328> [Accessed: 12 November 2025]. (In Russian)
- Rosstandart. GOST R 53678–2009. Petroleum and natural gas industries. Materials for use in H₂S-containing environments in oil and gas production. Part 2. Cracking-resistant carbon and low-alloy steels, the use of cast irons. Available from: <https://docs.cntd.ru/document/1200083327> [Accessed: 12 November 2025]. (In Russian)
- HySTRA. Hydrogen energy supply chain pilot project between Australia and Japan. Available from: <https://www.hystra.or.jp/en/project/> [Accessed: 12 November 2025].
- Neftegaz.RU. Suiso Frontier gas tanker has set off for Australia to pick up hydrogen. Available from: <https://neftegaz.ru/news/Suda-i-sudostroenie/718616-tanker-gazovoz-suiso-frontier-otpravilsya-v-avstraliyu-za-vodorodom/> [Accessed: 12 November 2025]. (In Russian)
- Advanced Hydrogen Energy chain Association for technology Development. Home page. Available from: <https://www.ahead.or.jp/en/research.html> [Accessed: 12 November 2025].
- Berger R. Hydrogen transportation. The key to unlocking the clean hydrogen economy. Available from: https://www.rolandberger.com/publications/publication_pdf/roland_berger_hydrogen_transport.pdf [Accessed: 12 November 2025].
- Buyanov AS, Goncharova AN. Simulation modeling as a tool for planning vessel operations on the line. In: Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping (Admiral Makarov SUMIS) Logistics: Modern development trends: Proceedings of the 17th International Scientific and Practical Conference, 12–13 April 2018, Saint Petersburg, Russia. Saint Petersburg: Admiral Makarov SUMIS; 2018. p. 113–116. (In Russian)
- TSNIIMF JSC. STO YAKUT.23.01–2025 (company standard). Feasibility study for the design, construction, and operation of ships. Key provisions. Available from: <https://cniimf.ru/> [Accessed: 12 November 2025]. (Accessible under specific conditions in the owner's local area network; in Russian)