

Данный материал был ранее опубликован. Ссылка для цитирования: С. Гриффитс, Дж. Уратани. Низкоуглеродное топливо на основе аммиака. 3-й ежегодный доклад Ассоциации "Глобальная энергия". С 4–19. Оригинальный полный текст доклада доступен по ссылке: https://globalenergyprize.org/ru/wp-content/uploads/2022/06/02545_22_brosh_GlobalEnergy_block_preview-2.pdf

С. Гриффитс, Дж. Уратани

Университет науки и технологий Халифа,
Абу Даби, ОАЭ

НИЗКОУГЛЕРОДНОЕ СУДОВОЕ АММИАЧНОЕ ТОПЛИВО

Введение. Около 90% продаваемых товаров зависят от морских перевозок как основного вида транспорта, и, по оценкам ОЭСР, к 2050 году морская торговля может увеличиться в три раза [1]. По данным ЮНКТАД, в 2019 году объемы морской торговли достигли 11,08 млрд тонн, и, хотя начавшаяся в 2020 году пандемия COVID-19 привела к его снижению на 4,1%, восстановление морских перевозок в 2021 году должно привести, согласно данным последнего отчета ЮНКТАД о морском транспорте, к увеличению объемов торговли на 4,8%, [2].

Хотя морской транспорт остается наиболее энергосберегающим и экономичным способом перемещения больших объемов товаров по всему миру (разбивка по типам товаров, перевезенных в 2019 году, представлена на рис. 1, сам размер этого сектора означает, что связанные с ним выбросы по-прежнему значительны).

По оценкам Международной морской организации (ИМО), в 2018 году выбросы парниковых газов на морском транспорте составили 1076 Мт CO_2 , экв, или 2,89% от всех антропогенных выбросов парниковых газов, а сопутствующее потребление энергии составило 9,1 ЭДж [3]. Текущие прогнозы ИМО для «инерционного сценария» (BAU), выполненные с учетом будущего спроса на морские перевозки, состава флота и топливного баланса, показывают, что выбросы CO_2 в 2050 году могут составить 90–130% от базовых значений 2008 года (что эквивалентно 100–150% от значений 2018 года). Эти значения согласуются с проведенными МАЭ оценками BAU сценария, согласно которым выбросы CO_2 в секторе морских перевозок в 2050 году составят 135% от значений 2018 года [4].

В то время как сектор воздушных перевозок, относящийся к еще одному виду транспорта, «слабо поддающемуся декарбонизации», недавно объявил о намерениях по достижению к 2050 году углеродной нейтральности в масштабах всей отрасли [5], морской сектор пока не ставил таких целей. Хотя отрасли морских грузоперевозок в отдельных странах (например, в таких странах Северной Европы, как Дания и Норвегия) объявили о намерениях по достижению углеродной нейтральности к 2050 году [6], текущие цели ИМО по сокращению выбросов парниковых газов по-прежнему предполагают (как показано на рис. 2) наличие выбросов в этом секторе в среднесрочной перспективе (т. е. сокращение выбросов CO_2 на 40% к 2030 году и на 70% к 2050 году, а также сокращение общих выбросов парниковых газов до 50% к 2050 году по сравнению с базовым уровнем 2008 года).

Для достижения целей по ограничению повышения средней глобальной температуры к концу этого века не более, чем на 1,5°C по сравнению с доиндустриальными уровнями, необходимо ускорение декарбонизации сектора морских перевозок, что потребует быстрых действий со стороны политиков, промышленных компаний и разработчиков технологий. Более того, если ИМО

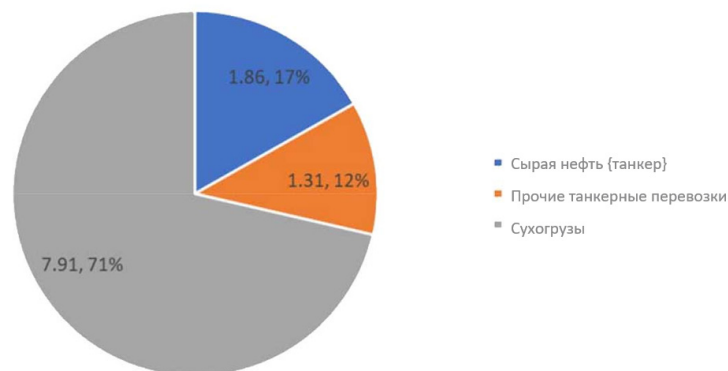
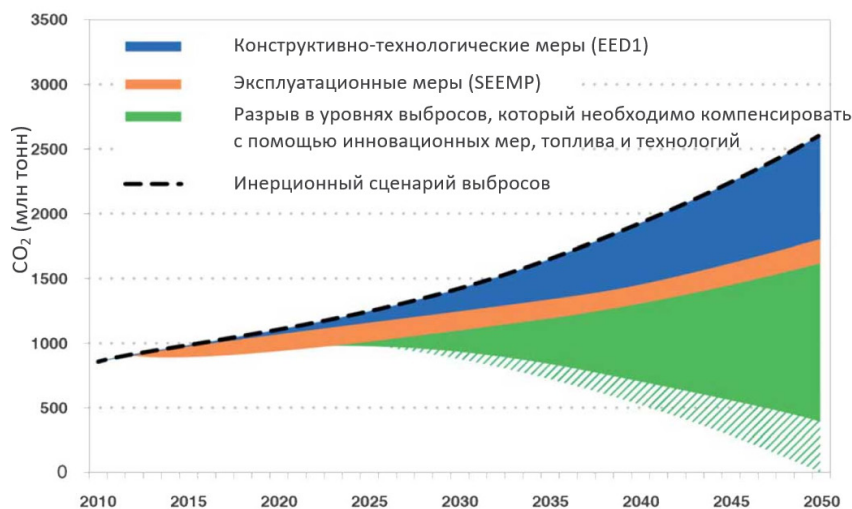


Рис. 1. Виды грузов, перевезенных морским транспортом в 2019 году (млрд тонн) [2]



Примечание: EEDI – Показатель проектируемой энергоэффективности; SEEMP – План управления энергоэффективностью судов. Текущие цели по сокращению выбросов показаны зеленым цветом, а область с зеленой штриховкой соответствует целям по достижению углеродной нейтральности к 2050 году [7]

Рис. 2. График сокращения общих выбросов парниковых газов, предлагаемый для достижения амбициозных целей ИМО

примет решение о достижении к 2050 году целевых показателей, соответствующих углеродной нейтральности (о чем свидетельствуют недавно принятые отраслевые и национальные обязательства [8]), то, вероятно, потребуется пакет решений по эффективной декарбонизации сектора морских перевозок.

Среди них ключевым решением является переход на декарбонизированное топливо (с соответствующим развитием производства топлива, инфраструктуры снабжения и совместимых силовых установок), позволяющие сократить прямые выбросы (табл. 1). В настоящее время различные виды декарбонизированного топлива, такие как биотопливо, электричество (например, электротопливо и системы аккумуляторов – топливных элементов), низкоуглеродный водород (и его производные, такие как аммиак и метанол), все еще рассматриваются и остаются многообещающими вариантами. Наиболее перспективными из них для использования в качестве судового топлива являются водород и, в особенности, аммиак. Поэтому в следующих разделах мы более подробно рассматриваем декарбонизированный аммиак как топливо для морских перевозок.

Таблица 1

**Обзор потенциальных сокращений выбросов
и ключевых характеристик альтернативных видов судового топлива [9]**

Потенциальное топливо	Максимальный потенциал сокращения выбросов парниковых газов (%)	Текущая стоимость топлива (\$/ГДж)	Углеродная эффективность (\$/t _{CO2})	Совместимость с существующими силовыми установками
СПГ	10%	7,1	340,1	Требуется газовый или двухтопливный двигатель, а также соответствующее криогенное хранилище
Био-СПГ	169% ^a	113	49,5	
Метанол	92%	28,7	305,3	Не синтетическое топливо, совместимо с модернизированными ДВС
Аммиак	79% ^b / 100% ^c	31,9	400,5	Совместимо с ДВС (искровое зажигание в сочетании с водородом или двухтопливный двигатель с запальным дизельным топливом)
Водород	95% ^b / 100% ^c	89,2	1,028,7	Совместим с ДВС (искровое зажигание или двухтопливный двигатель с запальным дизельным топливом), требует использования компрессоров или криогенного хранилища
FAME	84%	17,0	174,0	Синтетическое топливо (смесь < 20% FAME с ископаемым HVO)
БИО-мазут	91%	17,2	163,3	Синтетическое топливо (смесь или чистое)

Примечание: ^a – при использовании в процессе производства BECCS (биоэнергии с улавливанием и хранением углерода) возможны отрицательные выбросы; ^b – использование биологического синтеза; ^c – химический синтез с использованием возобновляемой или углеродно-нейтральной электроэнергии; СПГ – сжиженный природный газ; FAME – метиловые эфиры жирных кислот; HVO – мазут; ДВС – двигатель внутреннего сгорания.

Технология

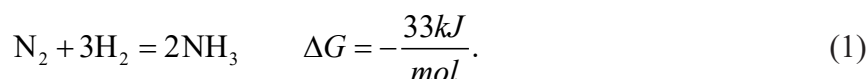
Использование аммиака в качестве энергоносителя предлагается в тех случаях, когда перво-степенное значение имеет плотность энергии (т. е. количество полезной энергии на единицу массы и/или единицу объема), а прямая электрификация проблематична из-за недостатков, присутствующих нынешним технологиям получения аккумуляторов. Несмотря на недавние достижения по применению аккумуляторных технологий для хранения электроэнергии, у химического способа хранения энергии плотность энергии по-прежнему на несколько порядков выше и, таким образом, он представляет собой более конкурентоспособный вариант для транспортировки тяжелых грузов на большие расстояния. В качестве потенциального химического топлива рассматриваются возобновляемые виды топлива (как углеродсодержащие виды топлива, так и топливо, не содержащих углерода), а их окончательная классификация зависит от способа их получения.

Согласно сценарию МЭА (NZE2050) по достижению углеродной нейтральности к 2050 году около одной трети потребности в водороде может быть связано с производством таких видов водородного топлива, как аммиак, синтетический керосин и синтетический метан. Этот специфический для транспорта спрос соответствует увеличению потребности с текущего значения, равного, примерно, 20 тыс. тонн H₂/год, до более чем 100 млн тонн H₂/год к 2050 году [10]. Расширенные варианты использования аммиака помимо применения его в химическом секторе (в первую

очередь для производства удобрений) наиболее заметно на морском транспорте (в частности, для дальних перевозок), где до 45% мирового спроса на судовое топливо может быть удовлетворено, согласно сценарию NZE2050, за счет аммиака.

Предпочтительным видом топлива для морских перевозок является аммиак. Это связано с тем, что его плотность энергии соответствует 23 МДж/кг и сравнима с плотностью энергии ископаемого топлива, такого как СПГ (55 МДж/кг) и бункерное топливо (т. е. мазут, 30–40 МДж/кг). Несмотря на то, что сам водород имеет гораздо более высокую плотность энергии на единицу массы (142 МДж/кг), объемная плотность энергии водорода в условиях окружающей среды составляет всего 13 МДж/м³, что составляет лишь незначительную часть от объемной плотности энергии мазута, равной 41500 МДж/м³ [11]. Сжижение водорода для достижения объемной плотности энергии значения 10039 МДж/м³ требует охлаждения водорода до температуры –253°С, что требует значительных затрат энергии. С другой стороны, аммиак можно сжижать, охладив его при атмосферном давлении до –33°С. Полученная в результате жидкость имеет объемную плотность энергии 15600 МДж/м³, что делает аммиак более пригодным для использования, чем водород, в тех случаях, когда требуется высокая объемная плотность энергии, например, при его использовании в качестве судового топлива [12]. В табл. 2 обобщены основные характеристики альтернативных видов низкоуглеродного судового топлива, которые в настоящее время исследуются для применения в секторе морского транспорта.

Промышленное производство аммиака – это устоявшийся процесс, разработанный в начале 20 века. Наиболее широко распространенный и технологически совершенный способ его производства основан на использовании процесса Габера-Боша, в котором чистый газообразный азот (N₂) объединяется в реакторе с газообразным водородом (H₂) в присутствии катализатора и в условиях высокой температуры и давления. Это экзотермическая (т. е. с выделением энергии) термодинамически выгодная реакция, представленная следующим идеальным уравнением:



В реальности, основные реакции, связанные с производством аммиака, сжиганием топлива и использованием топливных элементов, можно описать следующим образом [18]:

Традиционный синтез аммиака Габера-Боша:



Синтез возобновляемого аммиака:



Сжигание аммиака (использование в двигателях внутреннего сгорания, ДВС):



Разложение аммиака (использование в топливных элементах):



Внимание к аммиаку в качестве судового топлива связано с отсутствием выбросов CO₂ при его сжигании в качестве топлива в двигательных установках. Однако важно подчеркнуть необхо-

димось учета всех выбросов в производственном цикле, используемом для получения аммиака, поскольку в противном случае учет связанных с ним выбросов CO_2 просто перемещаются вверх по потоку к точке производства топлива.

Газообразный азот для аммиака обычно получают из атмосферы с помощью воздухоразделительной установки (ASU), водородный реагент традиционно получают с использованием обычных ископаемых источников. Около 95% мирового производства аммиака зависит от ископаемого топлива, при этом 72% мирового производства аммиака связано с использованием водорода, полученного из природного газа посредством парового риформинга метана (SMR), а для 22% мирового производства аммиака используется водород, полученный при газификации угля (основным производителем метана по данной технологии является Китай) [19]. Водород, полученный при риформинге природного газа, часто называют серым водородом, тогда как водород, полученный из угля, называют коричневым или черным в зависимости от источника угля.

Производство аммиака с низким и даже нулевым углеродным следом может быть достигнуто за счет перехода на использование низкоуглеродных и возобновляемых источников энергии для разделения, нагрева, фильтрации и очистки воздуха, а также использования голубого водорода (т.е. серого, коричневого или черного водорода в сочетании с CCUS – технологиями улавливания, использования и хранения углерода), зеленого водорода (получаемого, например, путем электролиза воды с использованием возобновляемых источников энергии), бирюзового водорода (получаемого, например, при расщеплении метана посредством пиролиза) или розового водорода (например, с применением электролиза воды с использованием атомной энергии). Низкоуглеродный водород, к которому в контексте данной работы относится водород с нулевым углеродным следом, может также производиться из органической фракции твердых бытовых отходов (OF-MSW), на очистных сооружениях (WWTP) или с помощью биоэлектрохимических систем, таких как микробные топливные элементы (MFC). Однако в настоящее время такие способы биологического синтеза аммиака не относятся к основным технологиям, применяемым в промышленном производстве аммиака.

Таким образом, основные альтернативы промышленному производству аммиака подразделяются, как правило, по «цвету» водорода, используемого в синтезе Габера-Боша: зеленый водород из возобновляемых источников энергии позволяет получать так называемый «зеленый аммиак», а голубому водороду из ископаемых источников в сочетании с технологиями улавливания, использования и хранения углерода (CCUS) соответствует «голубой аммиак». Эти две разновидности производства низкоуглеродного аммиака показаны на рис. 2 и 3 соответственно. При использовании в процессе производства голубого водорода таких технологий CCUS, как повышение нефтеотдачи (EOR) и/или производство синтетических углеводородов (например, синтез метанола), позволяющих получать другие продукты с добавленной стоимостью (рис. 3), голубой аммиак, получаемый из этого водорода не будет действительно углеродно-нейтральным. Если желательным продуктом является безуглеродный аммиак, то в производстве необходимо использовать зеленый водород (в соответствии с концепцией «power-to-X», рис. 4).

Для водорода и аммиака уже имеются инфраструктуры для их передачи, хранения и распределения, поскольку первый в настоящее время используется, в основном, в нефтеперерабатывающей и нефтехимической промышленности, а второй является одним из основных продуктов (около 175 млн т/год) химического производства и применяется, в частности, в производстве удобрений [22]. Хотя более широкое использование любого из этих энергоносителей в качестве топлива потребует дополнительных инвестиций в специализированную инфраструктуру, наличие возможностей по преобразованию или перепрофилированию существующих силовых установок и инфраструктуры на основе сжиженного нефтяного газа (СНГ) в системы на основе аммиака склоняет чашу весов в пользу последнего варианта [23]. Кроме того, двигатели, способные работать на аммиаке, смешанным с обычным углеводородным топливом (т. е. двухтопливные

**Сравнение основных альтернативных
низкоуглеродных видов топлива для морских перевозок**

Параметр	Альтернативное и низкоуглеродное судовое топливо					
	Водород	Аммиак	Метанол	Биометан	СПГ или Био-СПГ	Биодизельное топливо
Содержание углерода (масс. %)	0	0	37,5	74,8	≈75 (90–99% CH ₄)	86,9 (число углеродных атомов C ₈ –C ₂₀)
Плотность при 15°C (кг/м ³)	0,08 (1 бар) 39,69 (700 бар) 72,41 (жидкий)	0,72 (1 бар)	794,6	422,5 ^a	431 – 464 ^a	833 – 881
Температура кипения при 101,3 кПа (°C)	–253	–33	64,5	–161,5	–160	163 – 399
Низшая теплота сгорания (МДж/кг)	142	23	20	50	55	42,5
Объемная плотность энергии (МДж/м ³)	13 (окружающая среда*) 5600 (700 бар) 10000 (сжиженный –253°C)	15600 (сжиженный 33°C)	16000 (окружающая среда*)	37,8 (окружающая среда*) 32000 (800 бар)	20000–22000 (–160°C)	36000 (окружающая среда*)
Силовая установка	ДВС (одно-топливный) Топливный элемент (РЕМ, НТ-РЕМ, щелочной, фосфорнокислый, расплавленной карбонатный, твердооксидный)	ДВС (одно- или однопаливные двигатели) Топливный элемент (щелочной, мембранный щелочной, гидразин-борановый, боразановый твердооксидный) Водородный топливный элемент ^b (бортовая генерация водорода)	ДВС (одно- или однопаливные двигатели) Топливный элемент (с прямым окислением метанола, фосфорнокислый, расплавленной карбонатный, твердооксидный) Водородный топливный элемент ^b (бортовая генерация водорода из метанола)	ДВС (одно- или однопаливные двигатели)	ДВС (одно- или однопаливные двигатели)	ДВС (одно-топливный, стандартный двигатель для синтетического топлива)
УТГ ^c	7 (ДВС) 5 (ДВС)	6 (ДВС) 5 (ДВС)	5–6 (ДВС) 8–9 (ДВС)	10+ (ДВС)	10+ (ДВС)	10+ (ДВС)

Примечание: * – условия окружающей среды соответствуют стандартной температуре 25°C и давлению 1 бар; ^a – при температуре кипения метана; РЕМ – протонообменная мембрана; НТ-РЕМ: высокотемпературная РЕМ; ТЭ – топливный элемент; ДВС: двигатель внутреннего сгорания; ^b – при бортовой генерации водорода, применимы технологии водородных топливных элементов; ^c – Значения УТГ (уровня технологической готовности) основаны на расширенной шкале МЭА для оценки Технологий чистого развития [13]. Основано на данных [9–11, 14–17]

двигатели), предоставляют возможность перехода с постепенной заменой традиционного судового топлива [24, 25].

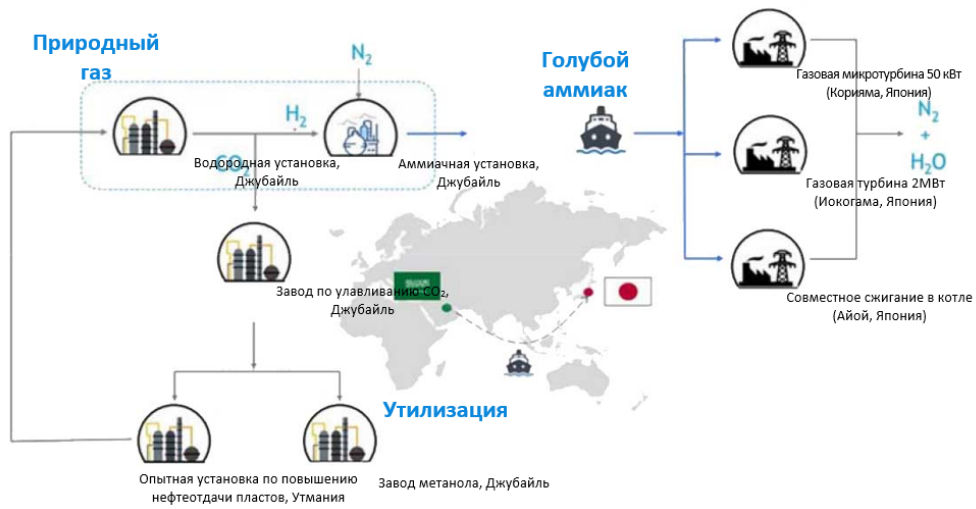


Рис. 3. Концептуальная блок-схема, демонстрирующая систему поставок голубого аммиака [20]

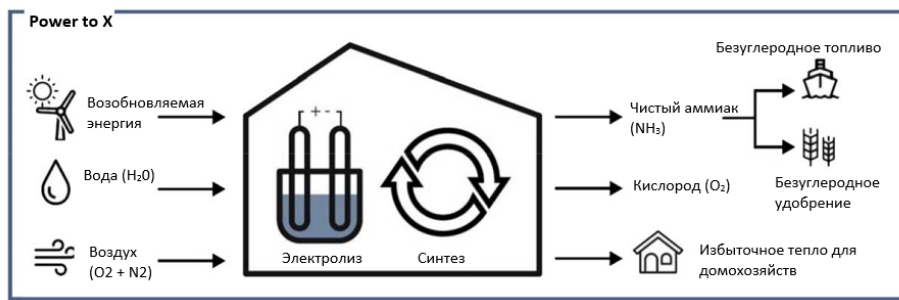


Рис. 4. Производство зеленого аммиака как пример применения концепции «power-to-X» [21]

Основным препятствием для широкого распространения зеленого водорода является отсутствие экономичных технологий его производства, в то время как голубой водород сталкивается с проблемами экономической осуществимости технологий CCUS, в особенности связанных с хранением CO₂. Кроме того, при использовании аммиака, полученного из низкоуглеродного водорода, в качестве судового топлива необходимо учитывать все плюсы и минусы различных альтернатив декарбонизации, как показано на рис. 5. В то время как прямая электрификация силовых установок с помощью возобновляемых источников электроэнергии в сочетании с хранением энергии позволяет получить КПД энергопреобразования, достигающим 80%, плотность энергии современных аккумуляторных технологий недостаточна для больших судов дальнего плавания, так как наличие требований к значительному весу и объему аккумуляторов приводит к необходимости снижения грузоподъемности судов. По сравнению с литий-ионными аккумуляторами, имеющими гравиметрическую плотность энергии, равную примерно 1 МДж/кг и объемную плотность энергии, равную примерно 2800 МДж/м³, аммиак с низким или нулевым содержанием углерода имеет гравиметрическую плотность, равную примерно 23 МДж/кг и объемную плотность энергии в жидком состоянии, равную примерно 15600 МДж/м³. Следовательно, аммиак предъявляет гораздо меньшие требования к объему хранилища и будет более подходящим вариантом декарбонизации при замене мазута. Что касается сравнения жидкого водорода и жидкого аммиака при их использовании в качестве судового топлива, то жидкий аммиак имеет объемную

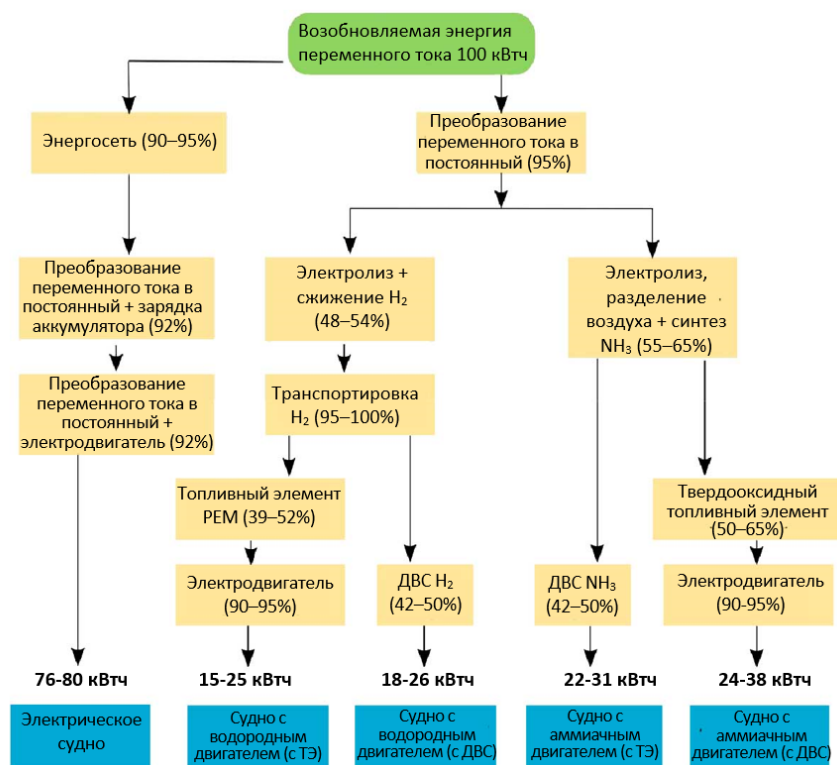


Рис. 5. Энергоэффективность потенциальных видов судового топлива, получаемых с использованием возобновляемых источников электроэнергии [6]

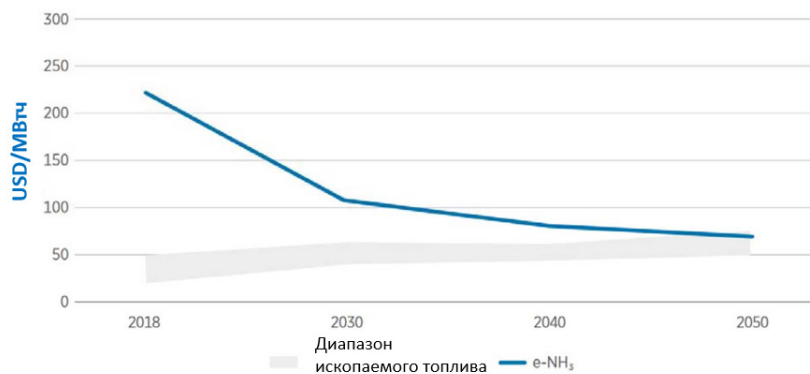
плотность энергии примерно на 55% выше, чем водород, и его можно сжигать при атмосферном давлении путем охлаждения до -33°C , тогда как водород для достижения жидкого состояния требует охлаждения при атмосферном давлении до -253°C . Следовательно, аммиак в целом является более экономичным вариантом топлива.

Экономический потенциал

Препятствием для более широкого внедрения зеленого аммиака остаются затраты на его производство [26], поскольку по текущим оценкам его цена составляет 480 долларов за тонну (около 1080 долларов за тонну нефтяного эквивалента), а приведенная стоимость водорода составляет 3,0 доллара за кг [27]. К 2030 году приведенная стоимость аммиака может упасть до 350 долларов за тонну (около 790 долларов за тонну нефтяного эквивалента) и до 310 долларов за тонну (менее 700 долларов за тонну нефтяного эквивалента) в определенных географических точках, таких как Океания [28]. Хотя цены на бункерное топливо в конце сентября 2021 года превысили 600 долларов за тонну нефтяного эквивалента [29], что связано с восстановлением цен на нефть до значения выше 80 долларов за баррель [30], затраты на тонну топливо и милю отгруженного груза для зеленого аммиака все еще выше (по сравнению с мазутом). Это связано с тем, что аммиак весит вдвое больше и требует в три раза больше места для хранения, чем мазут (для того же количества энергии). Чтобы соответствовать диапазону затрат на ископаемое судовое топливо необходимо, как показано на рис. 6, чтобы приведенная (к единице энергии) стоимость зеленого аммиака снизилась более чем на 65% и приблизилась к $60-70 \text{ \$/MВтч}$, что маловероятно в ближайшее время.

Стандарты и правила

Организации, занимающиеся промышленной стандартизацией, такие как Американское бюро судоходства (ABS), опубликовали в 2021 году руководящие документы по проектированию



Примечание. Стоимость продукта включает затраты на производство, транспортировку и логистику.

Источник: прогнозы стоимости энергии на NH₃ собственного производства; прогнозы стоимости топлива (Lloyd's Register, 2019; Ship & Bunker, 2019)

Рис. 6. Сравнение (прогноз) затрат на производство зеленого аммиака (e-NH₃) и ископаемого судового топлива [31]

и постройке судов, работающих на аммиаке [32]. Среди документации, относящейся к данной теме и опубликованной в 2021 году, следует отметить сборники правил по сертификации и обозначению классов, выпущенные, например, компаниями Bureau Veritas («Суда, работающие на аммиаке NR671 – предварительные правила») [33], RINA («Использование аммиака в качестве топлива» и обозначение класса «Готовность к аммиаку») [34], DNV (новое обозначение, учитывающее использование аммиака в качестве топлива, «использование аммиака в газовом состоянии в качестве топлива») [35] и Корейский регистр («Руководство для судов, использующих аммиак в качестве топлива») [36].

Эти руководящие документы соответствуют таким стандартам безопасности, как «Международный кодекс безопасности судов, использующих газы или другие виды топлива с низкой температурой вспышки» (также известный как Кодекс IGF) Международной морской организации (ИМО). Они также соответствуют другим инициативам ИМО по содействию устойчивому развитию, таким как «Международная конвенция по предотвращению загрязнения с судов» 1973 года («Конвенция МАРПОЛ») и отраслевые задачи по сокращению выбросов парниковых газов.

Дальнейшие перспективы

При оценке потенциала использования аммиака с нулевым и низким содержанием углеводов в качестве судового топлива очевиден ряд заметных преимуществ и возможностей данного топлива:

- **Налаженное производство углеродно-нейтрального или низкоуглеродного аммиака, обеспечивающее большие преимущества:** производство в химической промышленности аммиака, полученного из ископаемого топлива, привело к выбросам в 2018 году CO₂ в объеме, равном, примерно, 406 Мт в год, что превышает выбросы, соответствующие производству метанола (на уровне 211 млн т CO₂/год) и других ценных химикатов (258 млн т CO₂/год) [22]. Широкое внедрение аммиака в качестве судового топлива потребует широкого использования водорода, получаемого с помощью возобновляемых источников, а также низкоуглеродного водорода, в противном случае экологические выгоды от внедрения аммиака для морских перевозок не будут реализованы. Тем не менее, такие преимущества очевидны даже без учета декарбонизации, поскольку замена мазута аммиаком в целом полезна для морской среды (табл. 3) [37, 38].

- **Модернизация инфраструктуры и силовых установок.** Относительная простота модернизации существующей инфраструктуры, связанной с морскими перевозками, для использования

аммиака, является еще одним преимуществом, особенно при сравнении с требованиями к водородной инфраструктуре. Это связано с масштабом применения (например, инфраструктура доставки аммиака более широко развита, чем инфраструктура доставки водорода, в особенности в сжиженном виде), технической готовностью (например, инфраструктура для морских перевозок с использованием сжиженного углеводородного газа и сжиженного нефтяного газа аналогична инфраструктуре, необходимой для аммиака, и легко подвергается модернизации) и наличием нормативной базы (хотя аммиак и считается токсичным химическим веществом, нормативно база по обеспечению безопасности его использования для морских перевозок уже существует, а аналогичные правила для использования водорода все еще разрабатываются) [23, 39].

- **Безопасность, эксплуатационные характеристики и особенности регулирования.** Что касается проблем, связанных с использованием аммиака в качестве судового топлива, то его использование в двигателях и для производства электроэнергии в целом требует внимания. Использование аммиака в двигателях с воспламенением от сжатия затруднено из-за требований к более высокой степени сжатия для воспламенения по сравнению с применяемым в настоящее время жидким топливом. Преодоление этого ограничения возможно за счет использования аммиака в двигателях с искровым зажиганием или использования пилотного топлива с более низкой температурой воспламенения. В то время как первое менее желательно с технологической точки зрения из-за присущих данному методу проблем надежности, связанных с характеристиками воспламеняемости аммиака, второе технологически достижимо с помощью крекинга аммиака на месте эксплуатации с целью производства водорода (который имеет гораздо более широкий диапазон воспламенения и, таким образом, подходит для роли пилотного топлива) [40]. Новые технологии использования аммиака для выработки энергии включают в себя твердооксидные топливные элементы (ТОТЭ) и прямое сжигание в газовых/паровых турбинах, но показатели их энергоэффективности (как рабочий, так и тепловой КПД) еще не соответствуют показателям современных двигателей внутреннего сгорания [41].

Однако для реализации этих преимуществ и возможностей необходимы согласованные действия, в особенности, следующие:

- **Продолжение инвестиций в НИОКР.** Заинтересованные стороны в судоходной отрасли должны прилагать постоянные усилия для поддержки НИОКР, направленных на разработку систем производства аммиака, основанных на использовании возобновляемых источников, а также низкоуглеродного аммиака. Эти усилия напрямую связаны с развитием водородной экономики, поскольку независимо от того, будет ли для производства аммиака использоваться электричество или ископаемое топливо в сочетании с CCS, оба направления имеют несколько общих технологий, предполагающих производство водорода в качестве энергоносителя. Кроме того, дальнейшие разработки по использованию аммиака в качестве топлива могут иметь прямые последствия для реализации других вариантов использования данного топлива, прежде всего для таких стационарных применений, как балансировка энергосистемы. Таким образом, исследовательские усилия должны быть нацелены, как правило, на вывод на рынок технологий с низким и средним уровнем УГТ (уровня технологической готовности) и быть направлены на развитие различных технологий, проектирование и внедрением систем передачи, распределения и хранения, а также разработку бизнес-моделей и создание политических и нормативных стимулов, способствующие внедрению аммиака в оптимальные сроки. Кроме того, необходимо изучить потенциальные возможности синергизма с другими секторами конечного потребления, такими как сельское хозяйство, наземный транспорт и химическая промышленность, поскольку промышленные кластеры могут предоставить возможности снижения рисков для новых инвестиций в аммиачные проекты [18].

- **Требования к капитальным вложениям для замены флота и инвестиций в технологии.** Для достижения более широкого внедрения аммиака в качестве судового топлива необходимо модер-

Таблица 3

**Процентное снижение воздействия на окружающую среду при использовании аммиака
или водородного топлива вместо обычного мазута (в пересчете на тонна-км) [37]**

Тип судна	Топливо	Источник энергии для производства топлива	Экологическая токсичность морских отложений	Морская водная экологическая токсичность	Закисление	Абиотическое истощение	Разрушение озонового слоя	Абиотическое истощение
Грузовое судно	NH ₃	Биомасса	68%	69%	55%	63%	90%	63%
		Геотермальные воды/ бытовые отходы	73%	77%	83%	64%	90%	64%
		Гидроэнергия	72%	75%	82%	60%	89%	60%
		Ветер	67%	69%	82%	56%	87%	56%
	H ₂	Биомасса	80%	80%	75%	83%	94%	83%
		Геотермальные воды/ бытовые отходы	80%	86%	96%	85%	94%	85%
		Гидроэнергия	82%	84%	95%	81%	93%	81%
		Ветер	78%	80%	94%	76%	93%	76%
Танкер	NH ₃	Биомасса	74%	74%	77%	53%	85%	53%
		Геотермальные воды/ бытовые отходы	77%	77%	90%	54%	85%	54%
		Гидроэнергия	76%	76%	90%	55%	83%	55%
		Ветер	74%	74%	89%	49%	81%	49%
	H ₂	Биомасса	77%	78%	86%	70%	88%	70%
		Геотермальные воды/ бытовые отходы	79%	80%	96%	71%	88%	71%
		Гидроэнергия	78%	79%	96%	68%	90%	68%
		Ветер	75%	77%	96%	61%	90%	61%

низировать имеющиеся морские суда или заменить их судами с двухтопливными двигательными установками (т. е. обеспечивающих смешивание топлива с целью одновременного сжигания) или двигательными установками, адаптированными для использования аммиака. Проанализированные компанией DNV в последнее время сценарии позволяют дать оценку общего объема необходимых инвестиций за период с настоящего момента до 2050 года в диапазоне 250–800 миллиардов долларов с пиковыми инвестициями в 60 миллиардов долларов в год [17]. Кроме того, для производства достаточного количества зеленого и синего аммиака потребуются привлечение инвестиций в начальный этап технологического цикла с целью обеспечения к 2050 году мощности возобновляемых источников энергии до 8 ТВт или производительности установок CCS до 750 Мт CO₂/год, соответственно. В общей сложности для достижения к 2050 году углеродной нейтральности с целью полной декарбонизации сектора морских перевозок может потребоваться до 2,4 триллиона долларов, из которых 0,6 триллиона долларов необходимо потратить на меры по повышению эффективности судов (например, путем уменьшения сопротивления, очистки выхлопных газов и модернизации энергетических систем, без учета двигателей), 0,1 триллиона долларов на повышения эксплуатационной эффективности (в частности, с помощью оцифровки

и анализа больших данных) и 1,7 триллиона на альтернативные виды судового топлива (в основном, производство, хранение и транспортировка водорода и аммиака, бункеровка, бортовые хранилища, двигатели и силовые установки) [42]. Без активизации усилий по разработке и внедрению механизмов, обеспечивающих доступ к рынкам капитала и возможностям инвестирования в инфраструктуру, переход на аммиак в качестве декарбонизированного судового топлива может оказаться, с учетом требуемых больших сумм, невозможным.

- **Политическая поддержка и ожидания потребителей.** Необходим четкий и согласованный политический механизм для поддержки усилий судоходных компаний по сокращению выбросов за счет инвестиций в технологии и перехода на топливо с низким и нулевым содержанием углерода. В частности, требуется создание соответствующих механизмов выплат за выбросы углекислого газа в атмосферу, позволяющих избежать перемещение экологически вредных производств за границу, что имеет первостепенное значение, поскольку экономические стимулы для лиц, принимающих решения, часто являются важным фактором для преодоления организационной инерции и нежелания вводить новшества [43]. Кроме того, международные компании, доставка товаров которых в значительной степени зависит от сектора международных морских перевозок, также могут подтолкнуть своих поставщиков логистических услуг к ускорению принятия инициатив по углеродной нейтральности или снижению выбросов углерода. Глобальные компании, включая Amazon, Ikea, Unilever и шесть других компаний, в октябре 2021 года пообещали добровольно использовать к 2040 году только те грузовые суда, которые работают на безуглеродном топливе [44]. Этот тип «корпоративной активности» является отражением более широкой тенденции в экологических, социальных и управленческих (ESG) воззрениях, влияющей на деловую практику и инвестиции, поскольку компании стали пересматривать свои фидуциарные обязательства, более полно учитывая внешние последствия своей деятельности (ранее игнорировавшиеся или недостаточно учитываемые) [45].

Если все указанные действия по переходу на использование аммиака с низким и нулевым выбросом углерода в качестве судового топлива будут предприняты, а отмеченные возможности и преимущества реализованы, то в одном из секторов «тяжело поддающихся декарбонизации» будет сделан большой шаг вперед. Промышленные компании уже объявили в 2021 году о существенных мерах по внедрению судового топлива с низким и нулевым выбросом углерода, начиная с технико-экономических обоснований и заканчивая инициативами экспериментального и демонстрационного масштаба. Хотя не все эти проекты нацелены на использование аммиака в качестве судового топлива, тем не менее они обеспечивают существенное увеличение объемов производства низкоуглеродного аммиака, что необходимо для снижения затрат на использование данного топлива для морских перевозок. Судостроительных компаний в Японии (например, Mitsubishi Heavy Industries [46], Nihon Shipyard [47] и Nippon Yusen Kaisha [48]) и Кореи (например, Hyundai Heavy Industries [49] и Samsung Heavy Industries [50]) реализуют крупные проекты, направленные на внедрение силовых установок, работающих на аммиаке. Данные проекты разработаны в партнерстве с основными заинтересованными промышленными компаниями в европейских странах (например, AP Møller-Mærsk, Wärtsilä, MAN Energy Solutions, ECONNECT Energy), а также химическими компаниями (например, Yara International [51]).

Заключение

Преимущества низкоуглеродного и безуглеродного топлива, присущие данным видам топлива при решении задачи по декарбонизации сектора морских перевозок, могут быть достигнуты только при использовании низкоуглеродных технологий производства и учете выбросов по всей производственно-сбытовой цепочки. И водород, и аммиак, похоже, готовы к использованию в качестве низкоуглеродного топлива благодаря снижению производственных затрат за счет технологических инноваций, более широкого промышленного внедрения и повышения спроса на

кэптивном рынке, а также благодаря реализации политических механизмов, поддерживающих согласованные выплаты за выбросы CO₂. В секторе морских перевозок аммиак, по-видимому, имеет преимущество перед другими вариантами низкоуглеродного топлива, поскольку аммиак имеет хорошую гравиметрическую и объемную плотность энергии и в значительной степени совместим с существующей инфраструктурой доставки.

В 2021 году резко возросли промышленные усилия по использованию аммиака в качестве судового топлива, что требует дальнейшей поддержки развития систем производства аммиака (как синего, так и зеленого), а также технологий производства. Согласование данного применения аммиака с другими видами промышленной деятельности, в которых используется аммиак, а также с применениями, в которых он используется в качестве основного сырья, может способствовать более быстрому развитию инфраструктуры, а также снизить риски проектных инвестиций. По мере приложения усилий регулирующих органов по использованию аммиака в качестве судового топлива отрасль морских перевозок должна обеспечить через свои международные представительства и торговые органы согласование на глобальном уровне своих отраслевых задач по предотвращению выбросов с амбициозными глобальными целями по смягчению последствий изменения климата.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- [1] OECD, Ocean shipping and shipbuilding, (n.d.). <https://www.oecd.org/ocean/topics/ocean-shipping/>
- [2] UNCTAD, Review of Maritime Transport 2020, United Nations, New York, 2020.
- [3] IMO, Fourth IMO GHG Study, International Maritime Organization, 2020.
- [4] IEA, Energy Technology Perspectives 2020, International Energy Agency, Paris, 2020.
- [5] IATA, Net-Zero Carbon Emissions by 2050, (n.d.). <https://www.iata.org/en/pressroom/2021-releases/2021-10-04-03/>
- [6] International Transport Forum, Navigating Towards Cleaner Maritime Shipping: Lessons From the Nordic Region, OCED, Paris, 2020. <https://doi.org/10.1787/ab3d3fbc-en>.
- [7] IMO, Initial IMO GHG Strategy, (n.d.). <https://www.imo.org/en/MediaCentre/HotTopics/Pages/Reducing-greenhouse-gas-emissions-from-ships.aspx>
- [8] IEA, Net Zero by 2050, International Energy Agency, Paris, 2021. <https://www.iea.org/reports/net-zero-by-2050>
- [9] CONCAWE, A review of the options for decarbonising maritime transport by 2050 (Concawe Review 29.2), (2021). <https://www.concawe.eu/publication/a-review-of-the-options-for-decarbonising-maritime-transport-by-2050/>
- [10] IEA, Global Hydrogen Review 2021, International Energy Agency, Paris, 2021.
- [11] **Staffell I.** The Energy and Fuel Data Sheet, (2011). https://www.claverton-energy.com/wordpress/wp-content/uploads/2012/08/the_energy_and_fuel_data_sheet1.pdf.
- [12] ETC, Making the Hydrogen Economy Possible: Accelerating Clean Hydrogen in an Electrified Economy, Energy Transitions Commission, 2021. <https://www.energy-transitions.org/publications/making-clean-hydrogen-possible/>
- [13] IEA, ETP Clean Energy Technology Guide, IEA. (2020). <https://www.iea.org/articles/etp-clean-energy-technology-guide>
- [14] FCBI Energy, Methanol as a Marine Fuel Report, Methanol Institute, 2015. <https://www.methanol.org/wp-content/uploads/2018/03/FCBI-Methanol-Marine-Fuel-Report-Final-English.pdf>
- [15] **Markowski J., Pielecha I.** The potential of fuel cells as a drive source of maritime transport, IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. 214 (2019) 012019. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/214/1/012019>
- [16] **Xing H., Stuart C., Spence S., Chen H.** Fuel cell power systems for maritime applications: Progress and perspectives, Sustainability. 13 (2021) 1213.

- [17] DNV, Maritime Forecast to 2050, DNV, Høvik, Norway, 2021.
- [18] EPRI, Technology Insights Brief: Renewable Ammonia Generation, Transport, and Utilization in the Transportation Sector, (2019). <https://www.epri.com/research/products/000000003002015353>
- [19] **Dimitriou P., Javaid R.** A review of ammonia as a compression ignition engine fuel, *Int. J. Hydrog. Energy*. 45 (2020) 7098–7118. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.12.209>
- [20] **Saudi Aramco.** IEEJ, SABIC, World’s first blue ammonia shipment opens new route to a sustainable future, (2020). <https://eneken.ieej.or.jp/data/9135.pdf>
- [21] DFDS, Green Ammonia | Sustainable fuels, DFDS AS. (n.d.). <https://www.dfds.com/en/about/fuels/green-ammonia>
- [22] IEA, Chemicals, (2020). <https://www.iea.org/reports/chemicals>.
- [23] **Hansson J., Brynolf S., Fridell E., Lehtveer M.** The Potential Role of Ammonia as Marine Fuel — Based on Energy Systems Modeling and Multi-Criteria Decision Analysis, *Sustainability*. 12 (2020) 3265. <https://doi.org/10.3390/su12083265>
- [24] **Lindstrand N.** The case for two-stroke ammonia engines, MAN Energy Solut. (n.d.). <https://www.man-es.com/discover/two-stroke-ammonia-engine>
- [25] **Burgess J.** INTERVIEW: CMB targets ammonia dual-fuel ships from 2024, Antwerp hydrogen expansion, *SP Glob.* (2021). <https://www.spglobal.com/platts/en/market-insights/latest-news/petrochemicals/063021-interview-cmb-targets-ammonia-dual-fuel-ships-from-2024-antwerp-hydrogen-expansion>
- [26] **Prussi M., Scarlat N., Acciario M., Kosmas V.** Potential and limiting factors in the use of alternative fuels in the European maritime sector, *J. Clean. Prod.* 291 (2021) 125849. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.125849>.
- [27] **Shiozawa B.** The Cost of CO₂-free Ammonia, *Ammon. Energy Assoc.* (n.d.). <https://www.ammoniae-nergy.org/articles/the-cost-of-co2-free-ammonia/>
- [28] **Michael Nayak-Luke R., Bañares-Alcántara R.** Techno-economic viability of islanded green ammonia as a carbon-free energy vector and as a substitute for conventional production, *Energy Environ. Sci.* 13 (2020) 2957–2966. <https://doi.org/10.1039/D0EE01707H>
- [29] World Bunker Prices, *Ship Bunker.* (n.d.). <https://shipandbunker.com/prices>
- [30] Business Insider, Crude Oil Price Today | BRENT OIL PRICE CHART | OIL PRICE PER BARREL | Markets Insider, *Markets.Businessinsider.Com.* (n.d.). <https://markets.businessinsider.com/commodities/oil-price>
- [31] IRENA, Navigating the way to a renewable future: Solutions to decarbonise shipping, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi, 2019.
- [32] ABS, Guide for Ammonia Fueled Vessels 2021, (2021). https://ww2.eagle.org/content/dam/eagle/rules-and-guides/current/other/325_guide_ammonia_fueled_vessels/ammonia-fueled-vessels-sept21.pdf
- [33] **Bureau Veritas.** NR671 ammonia-fuelled ships - tentative rules, *Mar. Offshore.* (n.d.). <https://marine-offshore.bureauveritas.com/nr671-ammonia-fuelled-ships-tentative-rules>
- [34] RINA, RINA publishes new rules for the use of “ammonia as a fuel” and the class notation “Ammonia Ready,” (n.d.). <https://www.rina.org/en/media/news/2021/05/13/ammonia-fuel-ships>
- [35] DNV, Rules for classification of ships – July 2021 edition, DNV. (n.d.). <https://www.dnv.com/news/rules-for-classification-of-ships-july-2021-edition-203529>
- [36] Korean Register, [기술 규척 회보] Establishment of the “Guidelines for Ships Using Ammonia as Fuels,” (2021). http://www.krs.co.kr/sub/eng_board_read.aspx?no=13835&s_code=0401080000&b_code=006078000
- [37] **Elishav O., Mosevitzky Lis B., Miller E.M., Arent D.J., Valera-Medina A., Grinberg Dana A., ShterG.E., Grader G.S.** Progress and Prospective of Nitrogen-Based Alternative Fuels, *Chem. Rev.* 120 (2020) 5352–5436. <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.9b00538>
- [38] **Bicer Y., Dincer I., Vezina G., Raso F.** Impact Assessment and Environmental Evaluation of Various Ammonia Production Processes, *Environ. Manage.* 59 (2017) 842–855. <https://doi.org/10.1007/s00267-017-0831-6>

- [39] **Dolan R.H., Anderson J.E., Wallington T.J.** Outlook for ammonia as a sustainable transportation fuel, *Sustain. Energy Fuels*. 5 (2021) 4830–4841. <https://doi.org/10.1039/D1SE00979F>
- [40] **Valera-Medina A., Xiao H., Owen-Jones M., David W.I.F., Bowen P.J.** Ammonia for power, *Prog. Energy Combust. Sci.* 69 (2018) 63–102. <https://doi.org/10.1016/j.peccs.2018.07.001>
- [41] **Giddey S., Badwal S.P.S., Munnings C., Dolan M.** Ammonia as a Renewable Energy Transportation Media, *ACS Sustain. Chem. Eng.* 5 (2017) 10231–10239. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.7b02219>.
- [42] Global Shipping's Net-Zero Transformation Challenge, BCG Glob. (2021). <https://www.bcg.com/publications/2021/global-zero-carbon-shipping-transformation-challenge>
- [43] DNV, Pathway to Net Zero Emissions, DNV, Høvik, Norway, 2021. <https://eto.dnv.com/2021/about-pathway-to-net-zero>
- [44] **Thomas D.** Amazon, Ikea and Unilever pledge zero-carbon shipping by 2040, BBC News. (2021). <https://www.bbc.com/news/business-58970877>
- [45] **Gillan S.L., Koch A., Starks L.T.** Firms and social responsibility: A review of ESG and CSR research in corporate finance, *J. Corp. Finance*. 66 (2021) 101889. <https://doi.org/10.1016/j.jcorpfin.2021.101889>
- [46] Mitsubishi Heavy Industries, Project Launched to Probe Conversion of Existing Ships from Fossil-based Fuels to Decarbonized Energy Sources, Mitsubishi Heavy Ind. Ltd. (2021). <https://www.mhi.com/news/210520.html>
- [47] **Kawasaki N., Shimada K.** Japan shipbuilding pins comeback hopes on zero-emissions vessels, *Nikkei Asia*. (2021). <https://asia.nikkei.com/Spotlight/Environment/Climate-Change/Japan-shipbuilding-pins-comeback-hopes-on-zero-emissions-vessels>
- [48] NYK Line, Agreement Reached with Yara International for Joint Study of Ammonia-Fueled Ammonia Gas Carrier, (n.d.). https://www.nyk.com/english/news/2021/20210602_01.html
- [49] Bureau Veritas, HHI & KSOE receive Approval in Principle for Ammonia Carrier with Ammonia Fuel Propulsion, *Mar. Offshore*. (2021). <https://marine-offshore.bureauveritas.com/newsroom/hhi-ksoe-receive-approval-principle-ammonia-carrier-ammonia-fuel-propulsion>
- [50] Wärtsilä and SHI agree to collaborate on ammonia fuelled engines for future newbuilds, *Wartsila.Com*. (n.d.). <https://www.wartsila.com/media/news/22-09-2021-wartsila-and-shi-agree-to-collaborate-on-ammonia-fuelled-engines-for-future-newbuilds-2978445>
- [51] Yara International, Yara, JERA and Idemitsu Kosan explore clean ammonia bunkering and distribution collaboration in Japan, Yara International. (2021). <https://www.yara.com/corporate-releases/yara-jera-and-idemitsu-kosan-explore-clean-ammonia-bunkering-and-distribution-collaboration-in-japan/>

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

ГРИФФИТС Стивен – Старший вице-президент по научным исследованиям и разработкам, практикующий профессор Университета науки и технологий Халифа.

УРАТАНИ Джоао – Научный сотрудник Университета науки и технологий Халифа.