

УДК 620.98:656.61+504.7
EDN: XUYPFY

В.В. Магаровский, В.Н. Половинкин , А.В. Пустошный , О.В. Савченко
ФГУП «Крыловский государственный научный центр», Санкт-Петербург, Россия

НОВОЕ В МЕЖДУНАРОДНОЙ ПОЛИТИКЕ СНИЖЕНИЯ ЭМИССИИ ПАРНИКОВЫХ ГАЗОВ И НЕОБХОДИМЫЕ МЕРОПРИЯТИЯ В МОРСКОМ СЕКТОРЕ.

ЧАСТЬ 3. АЛЬТЕРНАТИВНОЕ ТОПЛИВО КАК МЕРА ДЛЯ ДОСТИЖЕНИЯ ЦЕЛЕВЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ЭМИССИИ ПАРНИКОВЫХ ГАЗОВ

Объект и цель научной работы. Целью является анализ перспектив применения альтернативных видов топлива с низкой и нулевой эмиссией углекислого газа на морском транспорте для снижения эмиссии парниковых газов мирового судоходства согласно требованиям Международной морской организации ООН (International Maritime Organization, IMO). В качестве объектов исследования рассматривались биотопливо, е-топливо, различные виды топлива с использованием водорода.

Материалы и методы. Анализ выполнялся на основе директивных документов IMO и Евросоюза (ЕС), а также публикаций российских экспертов.

Основные результаты. Показано, что в настоящее время внедрение всех видов альтернативного топлива в различных отраслях экономики находится на самой начальной стадии. В морском транспорте объем потребностей практически полностью покрывается традиционным ископаемым топливом с преобладанием тяжелого дизельного топлива, и без весомых стимулов судовладельцы не заинтересованы в изменении ситуации. Тем не менее в рассмотренных документах отношение к применению альтернативного топлива весьма оптимистично. Особенно перспективным как в плане снижения выбросов парниковых газов, так и в плане обеспечения производства топлива считается водородное топливо и топливо на основе водорода (аммиак). Применение такого топлива на судах должно сопровождаться принципиальным изменением в энергетике и решением ряда связанных с этим критически важных технических проблем.

Заключение. Настоящая статья является заключительной в серии трех статей, посвященных рассмотрению проблемы снижения эмиссии парниковых газов на морском транспорте. Проведенный анализ показал, что применение альтернативных видов топлива является практически единственным путем для удовлетворения требованиям и политическим амбициям IMO и ЕС в связи с необходимостью выполнения Парижских соглашений по климату 2015 г. Эффективность всех остальных средств, применяемых для энергосбережения и снижения эмиссии парниковых газов, позволяет рассматривать их только как дополнительные меры, которые не могут самостоятельно обеспечить выполнение требований. При этом IMO ставит вопрос так, что суда, не выполняющие требования по эмиссии парниковых газов, не смогут выполнять международные рейсы. Для перехода на использование альтернативных видов топлива необходимо проведение большого объема исследований, проработок и создания экспериментальных образцов в области энергетических установок, судов и инфраструктуры.

Ключевые слова: альтернативное топливо, биотопливо, водородное топливо, морской транспорт, эмиссия парниковых газов.

Авторы заявляют об отсутствии возможных конфликтов интересов.

Для цитирования: Магаровский В.В., Половинкин В.Н., Пустошный А.В., Савченко О.В. Новое в международной политике снижения эмиссии парниковых газов и необходимые мероприятия в морском секторе. Часть 3. Альтернативное топливо как мера для достижения целевых показателей эмиссии парниковых газов. Труды Крыловского государственного научного центра. 2023; 4(406): 174–190.

For citations: Magarovskiy V.V., Polovinkin V.N., Pustoshny A.V., Savchenko O.V. Novelties in international policy for reducing level of green house gas emission and required measures in marine sector. Part 3. Alternative fuels as a measure to reach target levels of green house gas emissions. Transactions of the Krylov State Research Centre. 2023; 4(406): 174–190 (in Russian).

UDC 620.98:656.61+504.7

EDN: XUYPFY

V.V. Magarovsky, V.N. Polovinkin^{id}, A.V. Pustoshny^{id}, O.V. Savchenko
Krylov State Research Centre, St. Petersburg, Russia

NOVELTIES IN INTERNATIONAL POLICY FOR REDUCING LEVEL OF GREEN HOUSE GAS EMISSION AND REQUIRED MEASURES IN MARINE SECTOR.

PART 3. ALTERNATIVE FUELS AS A MEASURE TO REACH TARGET LEVELS OF GREEN HOUSE GAS EMISSIONS

Object and purpose of research. The purpose is to analyze the prospects of applying alternative fuels with low or zero emissions of carbon dioxide for reducing the levels of green house gases in the world shipping according to the IMO requirements. The objects of research are biofuel, eco-fuel, various types of hydrogen fuels.

Materials and methods. Analysis is based on regulatory documents of IMO and EC, as well as on publications of the Russian experts.

Main results. At present all types of alternative fuel are shown to be only at an infancy stage of uptake in various sectors of economy. The requirements of marine sector are practically filled up by traditional fossil fuels with prevalence of heavy diesel oil, and shipowners have no strong motives to change the situation. Nevertheless, the documents under consideration take very optimistic views on alternative fuels. The hydrogen fuel and fuel based on hydrogen (ammonia) are thought the best options both in terms of reducing GHG emissions and production of fuel. Implementation of these fuel types demands major modifications in ship powerplants and new engineering solutions requiring large amount of R&Ds, development of experimental prototypes in the field of power installations, ship design and infrastructure.

Conclusion. This is the final in a series of three papers dealing with reduction of GHG emissions in the marine sector. The analysis has shown that the use of alternative fuel types is practically the only way to satisfy IMO and EC regulations and political ambitions in connection with the Paris climate agreement of 2015. The efficiency of other measures used in power engineering and efforts to reduce the levels of GHG emissions can be considered only as additional arrangements that are not capable to meet the set target levels alone. IMO puts the matter in such a way that the ships failing to satisfy the target GHG levels will be excluded from international shipping. Introduction of alternative fuel types are at their infancy, and a large-scale R&D program should be undertaken for solving the critical technical issues.

Keywords: alternative fuel, bio fuel, hydrogen fuel, marine sector, green house gas emissions.

The authors declare no conflicts of interest.

Введение

Introduction

В первой статье настоящей серии [1] были проанализированы директивные документы ИМО и ЕС, а также официальные документы РФ, определяющие политику по снижению эмиссии парниковых газов (Green House Gas – GHG, в международной практике используются также термины-синонимы «эмиссия CO₂», «эмиссия углерода», «эмиссия карбона»).

Проведенный во второй статье [2] анализ эффективности применения различных средств энергосбережения для снижения эмиссии GHG на судах показал, что экологические амбиции ИМО и ЕС не могут быть удовлетворены только средствами энергосбережения, и необходимы другие, более сильные меры.

Сегодня в качестве единственного пути для приближения к целевому показателю – снижению интегральной эмиссии от судоходства на 70 % к 2050 г. по сравнению с 2008 г. – рассматривается переход на альтернативное топливо, сгорание которого сопровождается нулевой или низкой эмиссией GHG. Эта мера требует внедрения ряда новых технических решений с тем, чтобы обеспечить не только применение альтернативного топлива (что в ряде случаев связано с применением энергетических установок нового типа), но и его производство, транспортировку, хранение, а также решение проблем безопасности.

В настоящей статье проведен анализ перспектив применения альтернативного топлива на морском транспорте на базе документов ЕС и ИМО, а также ряда публикаций российских экспертов. Рассмотрены также вопросы, связанные с обеспе-

чением судов таким топливом, и сформулированы направления исследований, необходимых для поддержки перехода на альтернативные виды топлива.

Основные виды альтернативного топлива и проблемы его внедрения

Main types of alternative fuels and implementation issues

Евросоюз провозглашает себя передовым отрядом по борьбе за экологию, поэтому в директивных документах ЕС [3–4] выполнена глубокая проработка различных аспектов внедрения альтернативного топлива с пониженной или нулевой эмиссией CO₂ при его сжигании. В [4] в качестве возобновляемого и низкоуглеродного топлива рассматриваются такие виды жидкого и газообразного топлива, как биотопливо (биодизель и биогаз, биометанол, этанол), электрическое топливо (е-дизель, е-метанол, е-газ), водород и его производные (аммиак).

По данным мониторинга использования топлива в морском секторе ЕС в 2018 г. (табл. 1), его расход в ЕС – 44 млн т – почти полностью покрывался жидким ископаемым топливом.

Согласно принятому в ЕС в 2020 г. Целевому плану по климату на период до 2030 г. [5] (Climate Target Plan 2030 – СТР), целевыми показателями на ближайшее время будут доли применения возобновляемого и декарбонизированного топлива в общем объеме топлива морского сектора 6–9 % к 2030 г., 30–35 % к 2040 г. и 86–88 % к 2050 г.

Решение этой задачи затрудняется несколькими факторами [4], в числе которых:

- инвестиционные риски, обусловленные сложностью прогнозирования эффекта от регулиро-

вания эмиссии CO₂ на климат и низкой степенью готовности технологий;

- более высокая стоимость альтернативного топлива;
- взаимная зависимость между потребностью, обеспечением и распределением топлива;
- возможность бункеровки судов за пределами ЕС, что позволяет вывести учет части углеродного топлива из-под надзора администрации ЕС;
- влияние географического фактора в морском секторе;
- конкуренция за грузопоток судов с другими видами транспорта (автомобильным или железнодорожным), ограничивающая возможность излишне жесткой декарбонизации.

ИМО также включило продвижение низкоуглеродного топлива и топлива с нулевым содержанием углерода в перечень мер по декарбонизации. Но детальная дискуссия по теме альтернативного топлива начата Комитетом ИМО по защите морской среды (МЕРС) только в 2021 г.

Под эмиссией понимается только процесс, при котором углекислый газ достигает атмосферы в несвязанном виде. Поэтому в качестве одного из важных путей снижения эмиссии в документах ЕС отмечается развитие технологий захвата и хранения CO₂ как при производстве низкоуглеродного топлива, так и при сжигании топлива.

Характеристикой качества топлива с точки зрения эмиссии CO₂ является значение коэффициента эмиссии Cf (масса эмитированного CO₂ на единицу массы топлива). Для различных видов топлива значения коэффициента представлены в табл. 2.

В ЕС в качестве характеристики эмиссии энергетических установок введен индекс интенсивности тепличных газов (GHG index). В отличие от вве-

Таблица 1. Данные Евросоюза по типу использованного в морском секторе топлива в 2018 г. [4]

Table 1. EC data on fuel types used in marine sector, 2018 [4]

Тип топлива	Доля в общем потреблении, %
Тяжелое дизельное топливо, мазут (HFO)	72,11
Морской газойль (MGO)	12,46
Легкое судовое топливо (LFO)	7,63
Морское дизельное топливо (MDO)	4,02
Сжиженный природный газ (LNG)	3,17
Другие*	0,6
Метанол	0,01
Сжиженный нефтяной газ (LPG) – бутан	0,00

* Топливо с нестандартным углеродным фактором 3,07 г CO₂/г топлива.

денного IMO индекса EEDI, в котором эмиссия отнесена к полезной транспортной работе, физический смысл GHG индекса следует из размерности – грамм эмиссии на джоуль мощности. Опуская достаточно объемную формулу для GHG-индекса, отметим, что в ней учитывается как эмиссия CO₂, так и расчетная эмиссия (в эквиваленте CO₂) других тепличных газов – оксида азота NO₂ и метана CH₄, способных попадать в атмосферу не только с выбросами, но и при утечках газового топлива.

Объем эмиссии этих газов существенно ниже эмиссии CO₂, но их тепличный эффект выше. Учет более широкой номенклатуры газов повышает репрезентативность GHG-индекса. В документах ЕС [4] приводится ориентировочный прогноз снижения GHG-индекса для судов во времени относительно принятого в качестве референсной точки осреднен-

ного значения GHG-индекса от энергии, использованной на судах в 2020 г. (табл. 3). Отметим, что в период с 2040 до 2045 г. планируется снижение GHG на 33 % – кратно выше, чем в остальные пятилетки.

При внедрении альтернативных видов топлива следует учитывать ряд факторов.

Необходимость технологической подготовки. В части готовности технологий биодизель, биометан, жидкое и газообразное электротопливо совместимы с существующей инфраструктурой и могут быть непосредственно применены на судах, работающих на жидком топливе или на газе. Однако обеспечение морского сектора такими видами топлива ограничено, а снижение эмиссии тепличных газов зависит от способа его производства. Другие виды альтернативного топлива могут быть применены на судах только после их модернизации.

Таблица 2. Коэффициент эмиссии CO₂ для различных видов топлива [4]

Table 2. CO₂ emission factor for various fuel types [4]

№	Вид топлива	Cf (г CO ₂ /г топл.)
1	HFO, LSFO,ULSF,	3,14
2	LFO	3,151
3	VLSFO	3,206
4	MDO, MGO	3,206
5	LNG	2,755
6	LPG бутан	3,03
7	LPG пропан	3,00
8	H ₂ (натур. газ)	0
9	NH ₃ (натур. газ)	0
10	Метанол (натур. газ)	1,375
11	Этанол (биожидакость)	1,913
12	Биодизель (из отходов)	2,834
13	HFO (из отходов)	3,115
14	Био-LNG (из отходов)	2,755
15	Био H ₂	0
16	е-дизель не биоисхождения	3,206
17	е-метанол не биоисхождения	1,375
18	е-LNG не биоисхождения	2,755
19	е- топливные элементы (ТЭ)	0

Таблица 3. Требование Евросоюза к снижению GHG-индекса [3]

Table 3. EC requirements regarding GHG index [3]

Год (с 1.01)	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Снижение, %	2	6	13	26	59	75

Наиболее технологически отработанным решением является природный газ, который имеет на 12 % меньший показатель эмиссии CO₂, а также удовлетворяет требованиям по выбросам SO_x и NO_x. Впервые LNG применили в качестве топлива в Норвегии в 2000 г., но даже сейчас его доля в общем объеме топлива крайне ограничена. Внедрение LNG существенно осложняют испарение метана и зависимость использования от технологических особенностей двигателей.

Стоимость альтернативного топлива выше по сравнению с ископаемым. Высокая стоимость производства биотоплива обусловлена новизной технологий и их разнообразием в связи с многочисленностью источников биомассы. Для е-топлива стоимость производства зависит прежде всего от стоимости используемой возобновляемой энергии. Для привлечения инвестиций в развитие альтернативного топлива на судах ЕС намеревается применить к морскому транспорту оплату эмиссии карбона, чтобы снизить разницу в цене между низкоуглеродным и традиционным морским топливом (очевидно, при этом более высокую цену перевозки оплатит потребитель транспортных услуг и конечный потребитель груза).

С учетом трудностей внедрения альтернативных видов топлива непосредственно на судах, в документах ЕС в качестве важной первоочередной меры по снижению эмиссии GHG рассматривается обеспечение судов при их обработке в портах береговым электричеством от возобновляемых источников энергии (ВИЭ). Ожидается, что это даст снижение эмиссии от судна около 6 %, но потребует создания в портах инфраструктуры для электроснабжения от ВИЭ. В Европе эта технология развивалась с 1990-х гг., так что многие порты имеют такой опыт. Энергоснабжение в портах также внесено в перечень ИМО краткосрочных мер по снижению эмиссии углекислого газа.

В качестве переходного топлива для электроснабжения судов в портах ЕС рассматривается использование природного газа. Альтернативой снабжению береговой энергией судов может быть применение в портах на судах низкоуглеродных технологий на борту – топливных элементов (ТЭ), заряжаемых с помощью низкоуглеродного топлива или ВИЭ, накопителей энергии на судне, ветровых генераторов, солнечных батарей.

Возможность берегового снабжения в портах только от низкоуглеродных источников или ВИЭ сомнительна. Например, поставка энергии с берега в порту Санкт-Петербург осуществляется с помо-

щью единой береговой сети, объединяющей разные генерирующие источники. Выделить, из каких источников пришла энергия – тепловых, с высокими карбоновыми выбросами, или от формально безэмиссионной атомной, невозможно. В ЕС для аналогичных ситуаций созданы прецеденты «промежуточных» решений. Так, для стимулирования производства «чистого» водорода [4] со ссылкой на Renewable Energy Directives [6] отмечено, что водород, произведенный на установках, соединенных с сетью, даже если в сети имеется только малая часть энергии от возобновляемых источников, засчитывается как 100 % возобновляемый водород.

Перспективы биотоплива

Biofuel prospects according to EC documents

В директиве ЕС 2018/2001 [7] дано определение биожидкости и биогаза как жидкость и газ, произведенные из биомассы. При использовании биомассы в качестве источника энергии может применяться жидкое биотопливо (например, биодизель), сжатый или сжатый биогаз, алкогольная продукция (в частности, биоэтанол). Биотопливо может применяться самостоятельно или в смеси с ископаемым топливом. Потребление биотоплива и биогаза во всех секторах экономики ЕС в период 2030–2050 гг. планируется увеличить примерно в 10 раз, а поставка биотоплива в международный морской сектор в основном будет включать биодизель, био-HFO и био-LNG [4].

Все виды биотоплива классифицируются в зависимости от источника сырья, из которого они производятся. В табл. 4 приводятся данные оценки распределения объема биомассы, необходимой для производства планируемого в ЕС количества биотоплива, по основным источникам ее получения.

Оценки показали, что ЕС имеет достаточно биомассы и био-LNG для международного морского сектора. К 2030 г. будет иметься достаточное количество отработанных липидов (жиров, не сельскохозяйственных масел, использующихся в кулинарии), так что поставки для международного морского сектора задействуют всего 20 % от их источников в ЕС. Имеются резервы для увеличения поставок не сельскохозяйственного биотоплива в морской сектор к 2050 г.

В качестве альтернативы рассматривается биотопливо сельскохозяйственного происхождения, в основном из лигноцеллюлозных источников, которое составит от 6 до 20 % имеющихся источников к 2050 г. Есть также планы увеличения

Таблица 4. Распределение биомассы по источникам сырья для получения биотоплива [4]

Table 4. Distribution of bio mass by sources of raw materials for production of biofuel [4]

Источник сырья	Потребление сырья, Мт	
	2030 г.	2050 г.
Урожай многолетних	0	7,7
Урожай однолетних	0,3	40,8
Лесхозпродукция	3,2	18,4
Лесхозотходы	1,5	14,7
Древесные отходы	1,8	8,0
Сельхозотходы	1,5	18,6
Навоз	1,2	3,3
Не сельхозмасла	0,83	1,8

доли навоза для производства био-LNG для морского транспорта с 2 % в 2030 г. до 5–6 % в 2050 г. (Для справки: лигноцеллюлоза, или лигноцеллюлозная биомасса – растительное сухое вещество, наиболее доступное для производства биотоплива, в основном этанола. Она получается в основном из дерева и состоит из углеводородных полимеров – целлюлозы, гемицеллюлозы, а также ароматического полимера – лигнина.)

При всем оптимизме в ЕС относительно применения биотоплива в морском секторе можно встретить противоречивые замечания по этому поводу.

Во-первых, согласно [4] в краткосрочной перспективе планируется на морской транспорт в основном направить тяжелое дизельное биотопливо, а биодизель – на дорожный транспорт. После 2030 г. автотранспорт хотят переводить на электро-тягу, стоимость биодизеля с развитием его производства будет снижаться, и тогда морской сектор станет ключевым драйвером в развитии технологий биодизеля и био-LNG.

Во-вторых, в настоящее время в морском секторе на 99 % используется ископаемое топливо, потребность в биотопливе близка к нулю. Коэффициент эмиссии различных видов биотоплива находится в диапазоне 2,75–3,115 [г CO₂/г топлива] (позиции 12–14 табл. 2), что равно показателям эмиссии соответствующих типов ископаемого топлива. Формально это сводит к нулю возможность декарбонизации судов при применении такого биотоплива до уровня, декларируемого документами ЕС и ИМО. В свою очередь, в [4] это трактуется как причина в перспективе не перенаправлять биотопливо из дорожного в морской сектор, чтобы не замедлять декарбонизацию транспортного сектора

в целом. Поэтому важно в потенциале не создавать в морском секторе потребности в большой массе биотоплива, продвигая его для нужд декарбонизации в других видах транспорта.

Эти замечания отражают неопределенность в отношении перспектив биотоплива в морском секторе и показывают, что биотопливо можно относить к средствам декарбонизации, если рассматривать его сжигание в ДВС как этап утилизации тепличных газов, выделяемых при разложении биомассы. Кроме того, использование биомассы из сельхозпродуктов и лесоматериалов вызывает резкие возражения в обществе в связи с выводом земель из сельхозоборота и продолжением вырубки лесов.

Е-топливо и энергия возобновляемых источников

Eco-fuel and renewable energy sources
(EC documents)

Согласно Википедии, «термин e-fuel охватывает различные виды альтернативного синтетического топлива, новый класс углеродно нейтральных видов топлива, которые производятся с помощью электроэнергии от ВИЭ, т.е. солнечной, ветровой и гидроэнергии». К такому топливу относятся, например, бутанол, биодизель и водородное топливо, а также спирты и углеродосодержащие газы – метан и бутан.

Иными словами, электрическим топливом может быть любая разновидность ископаемого топлива, изготовленная с использованием возобновляемого или низкоуглеродного источника электроэнергии. Для морского сектора рассматриваются жидкое топливо (е-дизель, е-мазут, жидкий

Таблица 5. Оценка потребности в электроэнергии для производства e-топлива [4]

Table 5. Electric power requirements for production of Eco-fuel for EC [4]

Электроэнергия, потребная для производства e-топлива	2030 г.	2050 г.
Потребная электроэнергия, ТВт·ч	1,8	246
Доля в общей генерации электроэнергии, %	0	2,0
Доля в генерации возобновляемой энергетики, %	0,1	4,7

аммиак), e-газ, углеродосодержащие газы (метан, бутан), спирты (e-метанол). Оценка электроэнергии, потребной для производства необходимого ЕС количества e-топлива, приведена в табл. 5.

Водород как альтернативное топливо

Hydrogen as an alternative fuel

В последние годы в развитых странах в качестве наиболее перспективного решения для достижения углеродной нейтральности к 2050 г. рассматривается применение водорода. Водород может служить топливом (как самостоятельно, так и наряду с другими видами топлива) в энергетике, на транспорте, в промышленности, для отопления. При его использовании не эмитируются CO₂ и другие виды загрязнения воздуха. Водород может служить средством накопления энергии (в т.ч. чтобы сбалансировать суточные и сезонные колебания энергии ВИЭ), а также средством для передачи энергии удаленным потребителям. Для его транспортировки и распределения можно использовать часть инфраструктуры, созданной для обработки натурального газа.

Водород производится по нескольким технологическим процессам, которые, в зависимости от используемых технологий и источников энергии, ассоциируются с широким диапазоном эмиссии, требуют различных затрат и потребностей в сырье. В [4] приведен ряд определений для каждого из типов водорода (*курсивом* даны «цветовые» термины, применяемые в отечественной литературе [9]):

- **Водород на ископаемом сырье** – водород, производимый из ископаемого топлива, главным образом – из натурального или угольного газа (*серый и бурый водород* соответственно). Этот процесс обеспечивает производство основной массы водорода, однако сопровождается высокой эмиссией углекислого газа (в ЕС она составляет от 70 до 100 млн т CO₂ ежегодно).
- **Водород на ископаемом сырье с захватом карбона** (*голубой водород*) – водород, производи-

мый из ископаемого сырья в ходе процесса, который включает захват части эмитируемого CO₂. Захват карбона существенно снижает эмиссию (до 90 %), но величина снижения существенно различна для разных технологий захвата.

- **Низкоуглеродный водород** – термин, охватывающий водород, произведенный на базе ископаемых источников с захватом карбона, и водород на базе электричества со значительно пониженной эмиссией карбона за жизненный цикл по сравнению с существующим производством водорода.
- **Синтетическое топливо, полученное из водорода**, – газообразное и жидкое топливо на базе водорода и углерода. Синтетическое топливо должно быть возобновляемым, так что возобновляемой должна быть его водородная часть. Такое топливо ассоциируется с очень разным уровнем эмиссии парниковых газов в зависимости от источника и процесса производства. В терминах, касающихся загрязнения воздуха, синтетическое топливо близко к ископаемому.
- **Водород на базе электричества** – водород, производимый с помощью электролиза воды электролизером, работающим от электрической энергии безотносительно от источника данного электричества. Полная эмиссия жизненного цикла такой водородной энергетики зависит от способа производства электроэнергии.
- **Возобновляемый, или чистый водород** (*зеленый водород*) – водород, производимый электролизом воды в электролизерах, работающих на электрической энергии от ВИЭ. Эмиссия тепличных газов за жизненный цикл такой водородной энергетики близка к нулю.

Для полноты картины необходимо упомянуть *желтый водород*, производимый из ископаемого топлива с использованием энергии АЭС, и *бирюзовый водород*, производимый с помощью пиролиза природного газа без эмиссии GHG.

Эмиссия при паровой переработке натурального газа составляет 9 кг CO₂/кг H₂, для процесса с захватом 56 % карбона – 4 кг CO₂/кг H₂, с захватом 90 % карбона – 1 кг CO₂/кг H₂.

Стоимости возобновляемого и низкоуглеродоводорода (€2,5–5,5 за кг) неконкурентны со стоимостью обычного ископаемого топлива (примерно €1,5 за кг) и с близкой стоимостью водорода из ископаемого сырья. Идея «уравнивания» цены водорода, произведенного из ископаемого газа с захватом карбона (около €2 за кг), и ископаемого топлива требует введения «углеродной платы» €56 за тонну CO₂. Исходя из идеи достижения карбоновой нейтральности, ЕС считает приоритетным производство возобновляемого водорода (с использованием ВИЭ) и ускоренно совершенствует и развивает и производство электролизеров, что уже привело к снижению их стоимости за последние 10 лет на 60 % с прогнозом снижения еще вдвое к 2030 г. Одновременно ЕС стимулирует развитие коммерчески эффективных энергетических систем. Все это приводит к снижению стоимости зеленого водорода, и к 2030 г. для регионов, где возобновляемая энергия дешева, прогнозируется снижение стоимости возобновляемого водорода до конкурентной величины €1–1,2 за кг.

Однако оценки показывают, что в краткосрочной и среднесрочной перспективе производство возобновляемого водорода будет недостаточно и дорого, и для снижения эмиссии существующих производств придется использовать более дешевые виды водородного топлива, параллельно развивая производство возобновляемого водорода. Поэтому развивать водородную энергетику в Европе придется поэтапно.

На первом этапе (2020–2024 гг.) стратегическая задача ЕС – установить по меньшей мере 6 ГВт электролизеров мощностью до 100 мВт и производить до 1 млн т зеленого водорода в год. Чтобы снизить потребность в развитии инфраструктуры для транспортировки водорода, предполагается в основном организовать его производство вблизи мест потребления. Основные потребители энергии на этом этапе – очистные сооружения, стальные и химические производства. Планируется также развитие инфраструктуры для захвата CO₂.

На втором этапе (2025–2030 гг.) стратегическая цель – увеличить мощность электролизеров от ВИЭ до 40 ГВт, а производство – до 10 млн т зеленого водорода. Его стоимость должна стать сопоставимой с другими видами водорода. Сеть пользователей будет развиваться для стальной промышленно-

сти, грузовиков, железнодорожного и некоторых видов морского транспорта. Водород станет составной частью интегрированных энергетических систем и будет средством ежедневной и сезонной их балансировки трансформацией энергии ВИЭ в водород, когда имеются ее излишки, и расходом водорода, когда энергии ВИЭ недостаточно или нет вовсе. Будет создаваться заправочная и транспортная инфраструктура для водорода с частичным использованием существующей газовой структуры.

На третьем этапе (2030–2050 гг.) производство водорода должно достичь больших масштабов, чтобы водородное топливо могло дойти до самых сложно декарбонизируемых секторов. Для производства зеленого водорода планируется использовать около четверти значительно возросшего к тому времени объема производимого электричества от ВИЭ. Это позволит внедрить синтетическое топливо на базе карбоно-нейтрального водорода в морской и авиационный транспорт. Натуральный газ может заменяться биогазом в производстве водорода с захватом и сохранением карбона.

Ожидается, что к 2050 г. в ЕС объем продаж водорода составит €630 млрд, доля водорода в объеме энергии ЕС увеличится до 13–14 % (с 2 % в настоящее время). Инвестиции на водородную энергетику в ЕС могут составить до €470 млрд, включая €220–230 млрд на расширение производства и прямую передачу 80–120 ГВт энергии от ВИЭ на электролизеры, €11 млрд на модернизацию существующих производств водорода с захватом карбона, €65 млрд на систему транспортировки и распределения водорода и заправочных станций. В эти суммы не входят инвестиции на развитие сети конечных пользователей и на производство низкоуглеродоводорода из ископаемого газа.

Одна из проблем развития водородной энергетики – потребность в большом количестве катализаторов (в основном металлов платиновой группы). Европа полностью зависима от снабжения 19 из 29 таких материалов, необходимых для электролизеров и ТЭ.

Важным условием распространения водородной энергетики является создание инфраструктуры для транспортировки водорода от производителя к потребителю. Транспортировку можно производить в жидком или газообразном виде, а также с использованием более крупных молекул в виде аммиака или в органических жидкостях, содержащих водород. Она может осуществляться через трубопроводы, грузовиками, при бункеровке судов на преобра-

зованных газовых терминалах. При этом водород может храниться, например, в соляных пещерах.

Для развития водородной энергетики, доработки ряда технологий до уровня полной готовности и начала работ по их внедрению ЕС считает принципиально важным поддержку развития исследований и инноваций. Сейчас прежде всего развиваются технологии электролиза и ТЭ базовой мощностью 1 МВт. В дальнейшем планируется развивать исследования для создания энергетических цепочек, включая:

- создание более эффективных и коммерчески привлекательных электролизеров большой мощности (сейчас – до 100 МВт, а в перспективе – до гигаваттов);
- развитие инфраструктуры для распределения, хранения и дозирования водорода, в т.ч. трансформация существующих газовых сетей;
- исследование вопросов безопасности в обеспечение создания сети конечных пользователей водорода на транспорте, разработка стандартов безопасности;
- сокращение потребления и поиск путей снабжения катализаторами с их заменой, повторным использованием и рециркуляцией.

Для поддержки первичного внедрения инноваций, направленных на снижение эмиссии CO₂, в ЕС, как и в ИМО, учрежден инновационный фонд, формируемый за счет оплаты карбоновой эмиссии и из штрафов. Средства фонда (€55–68 млрд на 2021–2030 гг.) могут расходоваться для всех секторов экономики, локализованных в ЕС, Исландии и Норвегии. Среди важнейших направлений финансирования отмечены:

- разработка водородного топлива для различных секторов транспорта;
- разработка технологий захвата и хранения карбона при производстве голубого водорода из натурального газа, складирова его в подземных геологических образованиях (CCS – Carbon Capture and Storage), или технологий захвата CO₂ для последующей переработки и использования (CCUS – Carbon Capture Utilisation and Storage);
- технологии производства водорода из природного газа термическим разложением в условиях недостатка кислорода с выделением твердого углерода (пиролиз); в документах ЕС они упоминаются кратко, но наш «Газпром» рассматривает их в качестве наиболее перспективного и экологичного направления (см. часть 6).

Отметим, что инновационному фонду запрещено финансирование любых проектов, связанных с ископаемым топливом. Исключение составляют заведомо рассматриваемые в качестве неприоритетных проекты, связанные с газовым топливом, для которых имеется обоснование с прогнозом существенного снижения эмиссии CO₂.

В отношении применения водородной энергетики на морском транспорте в [4] отмечалось, что для внутренних водных путей и морского транспорта на короткие дистанции водород может стать альтернативным топливом с низкой карбоновой эмиссией, особенно если в морском транспорте будет внедрена плата за CO₂. Для использования водорода в мореплавании на большие дистанции требуется увеличение мощности ТЭ с одного до нескольких мегаватт и развитие производства на основе возобновляемого водорода синтетического топлива, метанола и аммиака с высокой плотностью энергии. Возможно также применение смесей водорода и натурального газа.

В информационном документе Международного агентства по возобновляемой энергии [8] отмечаются аспекты, которые не акцентируются в документах ЕС, но важны для внедрения зеленого водорода как топлива на морском транспорте:

- Хранение водорода может производиться в металлических емкостях, а на берегу – в подземных хранилищах (в ЕС есть хранилища емкостью 2500 Мт или 82,8 ПВт·ч).
- Барьером для транспортировки по газовым сетям водорода и даже смеси водорода с газом является то, что существующее оборудование (турбины) не может работать со смесями с высоким процентом водорода. Также применение чистого водорода потребует существенного изменения энергооборудования и инфраструктуры судов. Поэтому целесообразно преобразовывать водород в аммиак и работать с ним. Сейчас проводятся разработки по адаптации двигателей судов и инфраструктуры под аммиак к 2024 г. Барьером служит необходимый объем инвестиций – около \$1 трлн.
- Энергоемкость водорода примерно в 3 раза меньше, чем у природного газа. Поэтому объем танков на судах для перевозки эквивалентного запаса энергии для аммиака должен быть в 3–4 раза больше, а для жидкого водорода – на 40 % больше объема существующих танков. Это приведет к снижению полезного объема для груза на 10–15 %.
- Использование и подготовка жидкого водорода требуют значительной энергии, а едкому и кор-

розионному аммиаку нужны специальные меры при загрузке, обработке и хранении. Так что обоим этим вариантам необходима безопасная инфраструктура.

Преимущества водорода обуславливают интерес к развитию чистой водородной энергетики во всем мире, которые можно проиллюстрировать примерами по данным [9].

- Мировой рынок водорода за 20 лет вырос с \$40 млн до \$12 млрд.
- Согласно водородной доктрине Германии, все сферы ее экономики будут переведены на водород к 2050 г. ЕС рассматривает возможность экспорта чистого водорода или возобновляемого электричества из Северной Африки с ее гигантским потенциалом солнечной энергии, а также кооперацию со странами Восточной и Южной Европы с размещением там 40 ГВт электролизеров, производства и элементов инфраструктуры. Ряд стран (Саудовская Аравия, Дания, Китай, Нидерланды, Норвегия, США) создают консорциумы для производства зеленого водорода с участием энергетических компаний и производителей оборудования для ВИЭ. В США и Китае разработаны национальные программы развития исследований по применению водорода в промышленности.
- В сфере морского транспорта в Норвегии для бункеровки паромов и круизных судов планируется строительство завода по производству водорода в Гейрангер-фьорде, вводится в эксплуатацию первый водородный паром, а фирма Norwegian Viking Cruises планирует построить первое в мире круизное судно с энергетикой на ТЭ и жидком водороде. В Италии тестируется использование ТЭ MS 30 фирмы Power Cell для декарбонизации судов и яхт фирмы Fincantieri. Корейские Samsung Heavy Industries и Bloom Energy объявили о разработке кораблей на базе твердотопливных элементов. В Японии фирма Kawasaki спустила на воду первый в мире корабль для перевозки жидкого водорода, а консорциум NYK Line разрабатывает туристический катер на 100 пассажиров на ТЭ.

Китай планируется увеличить количество автомобилей на водороде в 8 раз (до 50 000), и выпущен первый такой автомобиль с запасом хода 1000 км. В США разрабатывается крупнейший в мире карьерный самосвал на водороде, а фирма GM объявила о своей углеродной нейтральности к 2035 г., что подразумевает производство экологически чистой продукции и перевод заводов на зеленую энергию.

Проекты поездов на водородном топливе реализуются в Австрии и Германии. В нашей стране «Росатом» в кооперации с РЖД и «Трансмашхолдингом» планирует построить первый полигон для поездов на ТЭ на Сахалине. В целом подходы к развитию водородного топлива в России отличаются от подходов ЕС, прежде всего более широким взглядом на понятие «экологически чистого» водорода и технологии его производства (см. часть 6).

Анализ перспектив альтернативного топлива экспертами IMO

Analysis of outlook for alternative fuels by IMO experts

Наряду с анализом средств энергосбережения [2], корреспондентская группа МЕРС провела анализ перспектив применения альтернативного топлива на судах. Его результаты можно рассматривать как более практичные и консервативные по сравнению с оптимизмом документов ЕС. Вопрос о применении ТЭ рассмотрен также в [2].

Сжиженный натуральный газ (LNG) рассматривается как ближайшая замена традиционного топлива для снижения уровня эмиссии CO₂, оксидов азота NO_x, серы SO_x и твердых частиц. Суда, использующие LNG, удовлетворяют требованиям Tier III без дополнительной обработки выхлопных газов и будут привлекательны при эксплуатации в регионах с контролем эмиссии NO_x. К сожалению, эффект снижения эмиссии GHG при применении газового топлива (около 12 % по сравнению с HFO (табл. 2) или до 25 % при утилизации тепла двигателя [2]) уменьшается (примерно на 15 % в эквиваленте CO₂) за счет утечек метана CH₄. Стоимость LNG примерно равна стоимости HFO и существенно ниже стоимости дистиллированных сортов, что делает газ коммерчески привлекательным. Для использования LNG необходимо найти достаточно места для его хранения на борту, а также гарантированно иметь его в бункеровочных портах. Поэтому LNG перспективен прежде всего для регионального мореплавания, где дистанции переходов короче и порты бункеровки более предсказуемы. LNG может стать топливом, интересным для применения на танкерах, где имеются значительные площади на палубе для создания бункера LNG.

Суда, использующие LNG, могут иметь чисто газовые или двухтопливные двигатели, в качестве которых на рынке предлагаются только четырехцилиндровые среднескоростные дизели с прямой

передачей. Успешное использование LNG в мире доказано при эксплуатации нескольких десятков судов. Натуральный газ может быть преобразован для использования в ТЭ, однако в настоящее время интерес к этому ограничен из-за принципиальных проблем с ТЭ, касающихся их стоимости, долговечности и плотности энергии.

Природный газ может использоваться для судов ледового класса, но отсутствие инфраструктуры в северных районах создает проблемы с bunkровкой.

Биотопливо первого поколения делается по традиционным технологиям из сахара, крахмала, растительных масел и животных жиров. Среди видов этого топлива – биодизель (например, Fatty Acid Methyl Esters, FAME – метиловый эфир на основе окисленного жира) и растительные масла, которые можно непосредственно использовать в дизельных двигателях. Грубо говоря, биодизель может заменить дистиллированные виды ископаемого топлива, а растительные масла – тяжелые сорта. Технологии для конвертации биомассы в биотопливо, пригодные для использования в судовых двигателях, еще предстоит разработать.

Однако с биотопливом возможен ряд проблем, включая нестабильность при хранении, окисление, водосодержание, засорение топливных фильтров, образование эмульсии. Это требует тщательного выбора вида топлива и адаптации двигателя. Возможно использование смеси биотоплива с легким или тяжелым дизельным топливом, но необходимо доказать их совместимость. Оценки перспектив развития экономики показали, что из-за дороговизны биотоплива и проблем с его использованием на борту для снижения карбонового следа более перспективно применять биотопливо для обслуживания судов в портах. Использование биотоплива на ледовых судах не рассматривалось, но ясно, что перечисленные выше проблемы в холодном климате обостряются.

Метанол, как и LNG, рассматривается в качестве альтернативного топлива, которое может существенно снизить эмиссию [10]. Выхлоп при сгорании метанола не содержит серы и NO_x и почти не содержит твердых частиц. Метанол, как и метан CH_4 , который является главным компонентом LNG, содержит большую долю водорода, и это позволяет снизить на 10 % эмиссию по сравнению с тяжелым дизельным топливом. Метанол имеет хорошую воспламеняемость, при этом трудно инициировать его возгорание. Чтобы добиться возгорания метанола при использовании низ-

кооборотных дизелей на двойном топливе, впрыскивается пилотное топливо.

Поскольку пилотного топлива применяется очень мало, количество твердых частиц при сгорании такой смеси снижено на 99 %, а содержание NO_x составляет до 30 % по сравнению с тяжелым дизельным топливом. В отличие от систем на LNG, которые требуют применения ультранизкой температуры, системы на метаноле работают с жидкостью при нормальной температуре, что облегчает транспортировку и хранение. Стоимость метанола составляет около 1/3 стоимости LNG.

Рассматривается также применение в качестве топлива этанола с близким, но несколько меньшим снижением эффективности по снижению эмиссии. Снижение эмиссии GHG при применении метанола оценивается в 7–10 %, этанола – в 3–5 % по сравнению с топливом DMX. Применение метанола и этанола на судах ледовых классов не обсуждалось.

Российские эксперты о водородном топливе

Russian experts on hydrogen fuel

Для оценки перспектив использования водородного топлива и производства водорода в России полезно рассмотреть позиции отечественных экспертов.

Россия является одним из крупнейших поставщиков ископаемых углеводородов с преобладанием поставок природного газа по трубопроводам или с помощью LNG-газовозов. Развитие зеленой энергетики в Европе может изменить состояние рынка углеводородов в неблагоприятную для нашей страны сторону. Поэтому в России вопрос о применении водородного топлива рассматривается прежде всего с позиций экспорта газа.

В статье [12], опубликованной советником гендиректора ООО «Газпром экспорт» д.т.н. А.А. Конопляником, анализируются вопросы производства водорода и обозначены позиции «Газпрома» в связи с рассмотренными выше аспектами водородной энергетики.

Целевое направление ЕС на переход к зеленому водороду в [12] объясняется не только экологическими соображениями, но и стремлением к производству собственного топлива – чистого водорода полностью на европейском оборудовании, без поставок природного газа из-за рубежа (т.е. речь идет об энергетическом импортозамещении).

Автор [12] солидарен с позицией ЕС о невозможности на начальном этапе внедрения газовой энергетики закрыть все потребности только зеле-

ным водородом и о необходимости производства значительного его количества из ископаемого топлива. Как уже отмечалось, преобладающие сейчас две технологии производства серого водорода – паровой (MSR) и автотермический (ATR) риформинг метана – значительно дешевле производства зеленого водорода, однако сопровождаются существенной эмиссией CO₂. Для ее снижения требуется дополнить технологии MSR или ATR технологиями улавливания и захоронения CO₂ (CCS) или улавливания, хранения и использования углерода (CCUS). Применение комплексных технологий (например, MSR+CCS или MSR+CCUS) увеличивает себестоимость голубого водорода по сравнению с серым, по меньшей мере, на 20–40 %, хотя некоторые эксперты говорят о 100%-м увеличении себестоимости по сравнению с технологиями MSR и ATR.

В [12] отмечен ряд неточностей в терминологии ЕС, приводящих к подмене понятий, некорректной формулировке целей и выбору инструментов для их достижения. В частности, автор справедливо отмечает, что вместо термина «карбоновая нейтральность» более корректно использовать термин «климатическая нейтральность», поскольку цель ЕС – обнулить выбросы CO₂, достигающие атмосферы и влияющие на изменение климата.

Далее, в документах ЕС понятия «возобновляемый» («зеленый») и «чистый» водород используются как взаимозаменяемые. Однако все технологические цепочки, связанные с изготовлением оборудования ВИЭ (преимущественно в Китае), и им предшествующие, начиная с добычи редкоземельных металлов, являются экологически грязными. Таким образом, объявляя чистым производство электроэнергии водорода в странах ЕС, концепция ЕС не учитывает грязные части технологий производства водорода, выведенные за пределы ЕС, преимущественно в Азию.

Также в документах ЕС некорректно используются термины «CCS/CCUS технологии». Так, понятие экологически вредного CO₂ заменено на климатически нейтральный углерод C – carbon. Термин storage (S) трактуется как «хранение» (временное выведение товара из хозяйственного оборота с возможностью его возврата в оборот и монетизации), хотя реально речь идет о «захоронении» CO₂ – процессе безвозвратного удаления, например, в отработанные месторождения углеводородов в Северном море, где они вступают в реакции с горной породой, минерализуются и становятся непригодными для использования. Под термином «утилизация» (utilization – U (метано-водородной смеси))

понимается закачка CO₂ в продуктивные пласты нефтяных месторождений для повышения нефтеотдачи. При указанной трактовке терминов использование технологий CCS/CCUS подразумевает стимуляцию производства водорода вблизи скважин в добывающих странах с его транспортировкой через системы ГТС в Европу. Это требует перевода ГТС на транспортировку МВС (метано-водородной смеси). В Германии уже созданы технологии, позволяющие транспортировать МВС с содержанием водорода до 20 %.

Учитывая отмеченные противоречия, в [12] рассмотрено высокотехнологичное решение по производству низкоуглеродистого *бирюзового* водорода из метана без доступа кислорода (пиролиз, плазмохимический или иные методы) при нулевых выбросах CO₂. Для получения 1 м³ бирюзового водорода требуется 0,7–3,3 кВт·ч (для электролиза зеленого водорода из воды – 2,5–8 кВт·ч). Сравнение энергопотребления показывает, что производство водорода пиролизом природного газа без выбросов CO₂ будет дешевле по сравнению и с электролизом, и с технологией MSR+CCS/CCUS. Побочный продукт пиролиза – твердый углерод (сажа). В отличие от углекислого газа, он экологически нейтрален, а его удаление, захоронение или временное (даже долгосрочное) хранение не является технически сложной задачей, а его полезное использование может дополнительно повысить экономическую эффективность производства.

Таким образом, бирюзовый водород, получаемый из метана пиролизом, является чистым. Он полностью соответствует требованиям ЕС по углеродной нейтральности, а его производство не требует дополнительных затрат, связанных с CCS. Однако в ЕС этот углерод идеологически считается грязным именно из-за его происхождения от ископаемого природного газа. Он почти игнорируется в документах ЕС, согласно которым там, где технологии CCS технически неосуществимы, рассматриваются методы производства ультранизкоуглеродного водорода риформингом биометана, электролизом воды и, в долгосрочной перспективе, газификацией биомассы. Классификация ЕС ставит твердый углерод в один ряд с эмиссией CO₂ (побочный продукт MSR/ATR) и жестко стимулирует приоритетное развитие технологии производства водорода электролизом.

Сейчас промышленного производства водорода пиролизом не существует. В России проблемой пиролиза занимаются ПАО «Газпром» и Томский политехнический университет, в Германии – BASF,

Wintershall Deal, Linde, Uniper, Технологический музей Карлсруе, в Испании – Мадридский политехнический университет.

Тем не менее эксперты «Газпрома» видят для России новые возможности развития производства чистого водорода из российского природного газа без эмиссии CO₂. Учитывая экспортную политику холдинга, предлагается на первом этапе заместить другие типы топлива природным газом, на втором – декарбонизировать ГТС за счет снижения примерно на треть эмиссии CO₂ при производстве МВС на компрессорных станциях (КС) и использования этой МВС в качестве топлива вместо метана на КС. На третьем этапе планируется глубокая декарбонизация на основе перехода к производству водорода из метана без выбросов CO₂.

В докладе академика С.П. Филиппова на общем собрании ОЭММПУ РАН в 2021 г. [13] были рассмотрены дополнительные аспекты декарбонизации и внедрения водородной энергетики в России. По вопросу снижения эмиссии отмечено, что энергопотребление в РФ примерно в 2 раза выше мирового уровня и в 4–5 раз выше уровня развитых стран. Поэтому требуются существенные усилия по снижению энергозатрат, при этом нужно учитывать, что повышенный расход топлива необходим с учетом климата страны, а для судов – с учетом ледовых классов.

Согласно [13], применение солнечной энергетики для России малоперспективно из-за очень низкой плотности солнечной энергии. Наилучшие условия для ветровой энергетики сосредоточены в северных районах, откуда крайне сложно доставлять энергию. Характеристики производимой энергии ВИЭ носят стохастический характер, что приводит к неравномерности подачи тока от ВИЭ и, как показал опыт эксплуатации на юге страны, приводит к «выбиванию» электросетей.

В [13] отмечено, что для развития водородного цикла (производство – хранение – использование электроэнергии) в России имеются критическое отставание в разработке электролизеров и ТЭ, большие трудности в создании рынка потребления, перспектива острого недостатка катализаторов и отсутствие решения проблемы удаления катализатора из произведенного водорода. Разработки пиролиза метана в плазме или в расплавленных металлах находятся на завершающей стадии. Для России наиболее эффективным может быть производство водорода на основе атомной энергии, однако все атомные станции могут производить 0,5 млн т водорода, при том, что его производство

в стране составляет около 5 млн т (55 % из них трансформируется в аммиак, 13 % – в метанол), а это 6–7 % мирового производства.

В связи с проблемой катализаторов необходимо отметить, что в качестве катализаторов используются в основном редкоземельные металлы – платиноиды. (Для справки: к платиноидам относятся шесть металлических элементов – платина, палладий, рутений, родий, осмий и иридий; основные по потреблению – платина и палладий. Палладий используется в катализаторах выхлопных систем ДВС, но имеются большие перспективы его использования вместо платины в качестве стандартного катализатора для запуска водородной реакции в ТЭ. Привлекательно, что Россия производит 45 % всего мирового объема потребления палладия.)

В [14] содержится информация о расширении производства редкоземельных металлов. Начинается проект по разработке месторождения Федорова тундра в Мурманской области, где запасы платиноидов оцениваются примерно в 350 т, с годовой добычей 8 т платиноидов в концентрате, включая палладий.

Среди первых прецедентов внедрения водородной технологии на транспорте в России [10] упоминаются испытания в 2019 г. водородного трамвая в Петербурге и разработка опытного экземпляра водородного автобуса с окончанием в 2022 г. по договору Правительства Москвы, «КамАЗ» и «Роснано». В Европе в 2020 г. было 150 водоробусов, а к 2025-му планируется создать еще 1200 машин на ТЭ.

Этот опыт позволяет оценить проблемы применения водородных технологий на морском транспорте.

Во-первых, высокая цена водородной техники. Закупочная цена водоробуса в США составляет €1,1 млн, за следующие 5 лет планируется сократить ее до €735 тыс. Стоимость водоробусов европейского производства планируется довести до €50 тыс., что сопоставимо с ценой на электробусы, заменяющие троллейбусы в Москве. Для сравнения, сейчас стоимость дизельных автобусов в России составляет: китайское производство – 11,5 млн руб. (газовый – 12,5 млн руб.), европейское производство – от 22 до 30 млн руб. То есть даже самые дорогие дизельные автобусы примерно в 2 раза дешевле перспективных водородных.

Во-вторых, расход водородного топлива достаточно велик: один водоробус потребляет в день от 10 до 30 кг водорода, или почти 11 т водорода в год. Опытный завод Toshiba в Фукусиме с электролизером мощностью 10 МВт на солнечных батареях

имеет производительность 900 т водорода в год. Для парка автобусов России (409 тыс. машин), понадобится 4,5 млн т водорода в год, что сопоставимо с планируемыми на 2035 г. объемами экспорта зеленого водорода из России (от 1 до 7 млн т).

При оценке перспектив применения водородного топлива на судах внутреннего плавания необходимо учитывать, что мощность таких судов в 5–10 раз больше мощности автобусов, однако количество судов на 3–4 порядка меньше, так что при развитем производстве водородного топлива сложностей с его количеством не предвидится. Проблема будет в доставке и обработке топлива в отдаленных местах бункеровки.

Приведенный анализ указывает, что вопрос внедрения водородных технологий в мире уже переходит из состояния проектов к реализации конкретных проектов. При принятии решения по продвижению водородного топлива на морском транспорте в России и при рассмотрении необходимых для этого мер необходимо учитывать возможности производства в нашей стране различных видов водорода. Производимые в настоящее время серый и голубой водород, согласно политизированной позиции ЕС, обесмысливают идею перехода на экологически чистое топливо. ИМО занимает несколько более приближенную к практике позицию. Однако согласно [12] в России возможно производство чистого бирюзового, а также желтого водорода, за международный экологический статус которых предстоит серьезная борьба.

Заключение

Conclusion

1. Анализ, проведенный в серии статей [1–2], показал, что в настоящее время из-за постоянного роста объемов грузоперевозок величина снижения эмиссии GHG в морском секторе не соответствует требованиям, определяемым Парижским соглашением. Анализ мер энергосбережения, применяемых для снижения эмиссии с судов [2], показал, что эффективность каждой из таких мер составляет около 5 %, что не может обеспечить достижение цели снижения интегральной эмиссии судоходства на 70 % к 2050 г.
2. ИМО разработана новая система требований по снижению эмиссии GHG, которая потребует от судов, находящихся в эксплуатации, периодической модернизации для снижения эмиссии. Несоответствие судна требованиям ИМО будет означать невозможность выполнения им меж-

дународных рейсов. Новые требования ИМО, коррелирующиеся с Парижским соглашением, диктуют необходимость использования альтернативного топлива с низкими и нулевыми углеродными выбросами.

3. Анализ альтернативных видов топлива показал, что перспективными видами топлива с низкой или нулевой углеродной эмиссией являются водород и аммиак, при этом в ЕС они считаются такими, только если произведены на возобновляемых источниках электроэнергии. Как топливо с низкой углеродной эмиссией рассматривается и биотопливо, в частности метанол (спирты). В принципе эмиссия сжигания, например, биодизеля близка к эмиссии обычного дизельного топлива, при этом утилизируются выбросы парниковых газов от разложения биокомпонентов, которые иначе бы выходили в атмосферу. ИМО не видит больших перспектив массового применения биотоплива на морском транспорте.
4. В России политика, связанная с выполнением Парижских соглашений, определяется Указом Президента РФ № 666 от 4 ноября 2020 г. и «Стратегией социально-экономического развития Российской Федерации с низким уровнем выбросов парниковых газов до 2050 г.». Указом ставится задача обеспечить сокращение к 2030 г. выбросов парниковых газов до 70 % по отношению к 1990 г. С учетом максимальной поглощающей способности лесов и иных экосистем и при условии устойчивого и сбалансированного социально-экономического развития страны.
5. Наиболее перспективным альтернативным топливом в России может рассматриваться водородное топливо, производство которого активно поддерживается «Газпромом» (в свете развития его экспортной политики) и «Росатомом». Поскольку углерод, производимый сейчас в России трансформингом природного газа с выделением значительного объема CO₂, не признается ЕС в качестве зеленого водорода и не рассматривается как низкоуглеродное топливо, «Газпром» запатентовал и активно продвигает пиролиз природного газа, где углерод выделяется и собирается в виде собственно углерода (сажи), что позволяет считать его экологически чистым.
6. Применение водородного, как и других типов альтернативного топлива, является революционным изменением направления развития

техники. Это требует большого объема исследований по обеспечению производства, транспортировки, хранения, внедрения, создания инфраструктуры, решения вопросов безопасности альтернативного топлива.

Направления будущих исследований

Avenues of future research

Обобщая выводы всех трех статей серии, можно сформулировать следующие направления исследований, необходимых для удовлетворения новым требованиям ИМО по снижению эмиссии парниковых газов:

1. Участие в разработке и совершенствовании национального плана и стратегии, направленных на снижение GHG эмиссии от международного судоходства согласно краткосрочным мерам, предусмотренным ИМО.
2. Определение номенклатуры новых и эксплуатирующихся судов в России, попадающих под регулирование новыми правилами ИМО во временном диапазоне до 2030 г.
3. Определение величины эмиссии парниковых газов судами РФ в базовом 2019 г. в настоящее время и до 2030 г. Определение интегрального потенциала по снижению эмиссии в обоснование возможного вклада морского и речного транспорта в выполнение показателей Указа Президента РФ № 666 и «Стратегии социально-экономического развития Российской Федерации с низким уровнем выбросов парниковых газов до 2050 г.».
4. Рассмотрение перечня мер по улучшению рейтинга углеродной интенсивности СИ на эксплуатирующихся судах. Разработка новых технических решений в области гидродинамики (воздушная смазка, новые технологии покрытий, энергосберегающие устройства и технологии), пригодных для работы на судах ледового класса.
5. Проработка возможности применения водородной энергетики и гибридной (смеси водорода и природного газа) энергетики на транспортных судах в качестве средства снижения углеродной интенсивности. Проработка возможностей безопасного хранения водорода (в качестве альтернативы – аммиака) на судах. Выбор типов водорода (по способу производства и форме хранения) для применения на судах и разработка инфраструктуры для бункеровки.
6. Разработка инфраструктуры для берегового электропитания судов во время их обработки в портах с использованием возобновляемой или низкоуглеродной энергетики.
7. Разработка концепт-проекта судна для перевозки водорода или аммиака с решением задач безопасности и особенностей воздействия водорода на металлы.
8. Проработка концепт-проектов судов на гибридном или водородном топливе и проектно-исследовательская проработка с определением целесообразных областей применения и достижимых характеристик таких судов.

Список использованной литературы

1. Новое в международной политике снижения эмиссии парниковых газов судами и необходимые мероприятия в морском секторе. Часть 1. Анализ руководящих документов, определяющих новую политику снижения эмиссии парниковых газов / В.В. Магаровский, В.Н. Половинкин, А.В. Пустошный, О.В. Савченко // Труды Крыловского государственного научного центра. 2022. Вып. 4(402). С. 141–156. DOI: 10.24937/2542-2324-2022-4-402-141-156.
2. Новое в международной политике снижения эмиссии парниковых газов судами и необходимые мероприятия в морском секторе. Часть 2. Анализ эффективности энергосберегающих мероприятий, применяемых для снижения эмиссии парниковых газов / В.В. Магаровский, В.Н. Половинкин, А.В. Пустошный, О.В. Савченко // Труды Крыловского государственного научного центра. 2023. Вып. 1(403). С. 167–182. DOI: 10.24937/2542-2324-2023-1-403-167-182.
3. Proposal for a Directive of the European parliament and of the council amending Directive 2003/87/EC establishing a system for greenhouse gas emission allowance trading within the Union, Decision (EU) 2015/1814 concerning the establishment and operation of a market stability reserve for the Union greenhouse gas emission trading scheme and Regulation (EU) 2015/757 // EUR-Lex : [site]. Brussels, 2021. URL: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/ALL/?uri=CELEX:52021PC0551> (accessed: 10.08.2022).
4. Proposal for a Regulation of the European Parliament and the Council on the use of renewable and low-carbon fuels in maritime transport and amending Directive 2009/16/EC // EUR-Lex : [site]. Brussels, 2021. 36 p. URL: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A52021PC0562&qid=1660202496723> (accessed: 10.08.2022).
5. 2030 Climate Target Plan // European Commission : [site]. Brussels, 2020. URL: <https://ec.europa.eu/info/>

- law/better-regulation/have-your-say/initiatives/12265-2030-Climate-Target-Plan_en (accessed: 20.11.2023).
6. Directive 2009/28/EC of the European Parliament and of the council of 23 April 2009 on the promotion of the use of energy from renewable sources and amending and subsequently repealing Directives 2001/77/EC and 2003/30/EC // Official Journal of the European Union. 2009. Vol. 52. P. 16–62. (L Series ; № 140).
 7. Directive (EU) 2018/2001 of the European Parliament and of the Council on 11 December 2018 on the promotion of the use of energy from renewable sources (recast) // Official Journal of the European Union. 2018. Vol. 61. P. 82–209. (L Series ; № 328).
 8. Green Hydrogen :A guide to Policy Making / International Renewable Energy Agency (IRENA). Abu Dhabi, 2020. 67 p.
 9. *Кантемиров В.* Энергетика 2.0 и «Водородная долина» в России // Военное обозрение : [сайт]. 2021. 4 февр. URL: <https://topwar.ru/179612-jenergetika-20-i-vodorodnaja-dolina-rossii.html> (дата обращения: 20.11.2023).
 10. *Акопян А.* Водородный транспорт в России. Миф или ближайшее будущее? // Нескучные технологии : [сайт]. 2022. 08 февр. URL: https://itcrumbs.ru/vodorodnyj-transport-v-rossii-mif-ili-blizhajshee-budushhee_70475 (дата обращения: 20.11.2023).
 11. Marine Methanol : [site]. [Göteborg], 2023. URL: <http://marinemethanol.com> (accessed: 20.11.2023).
 12. *Конопляник А.* Чистый водород из природного газа // Газпром : [корп. журнал]. 2020. № 9. С. 20–29. URL: <https://www.gazprom.ru/f/posts/11/338791/gazprom-magazine-2022-09.pdf> (дата обращения: 20.11.2023).
 13. *Филиппов С.П.* Приоритетные технологические направления декарбонизации энергетики. Доклад на общем собрании ОЭММПУ РАН 2021 г.
 14. Россия делает ставку на платину и палладий // Прайм : [сайт]. 2022. 08 февр. URL: <https://1prime.ru/exclusive/20220208/836018040.html> (дата обращения: 20.11.2023).
 - measures in marine industry. Part 2. Efficiency analysis of power-saving measures intended to reduce greenhouse gas emissions / V.V. Magarovsky, V.N. Polovinkin, A.V. Pustoshny, O.V. Savchenko // Transactions of Krylov State Research Centre. 2023. Vol. 1(403). P. 167–182. DOI: 10.24937/2542-2324-2023-1-403-167-182 (in Russian).
 3. Proposal for a Directive of the European parliament and of the council amending Directive 2003/87/EC establishing a system for greenhouse gas emission allowance trading within the Union, Decision (EU) 2015/1814 concerning the establishment and operation of a market stability reserve for the Union greenhouse gas emission trading scheme and Regulation (EU) 2015/757 // EUR-Lex : [site]. Brussels, 2021. URL: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/ALL/?uri=CELEX:52021PC0551> (accessed: 10.08.2022).
 4. Proposal for a Regulation of the European Parliament and the Council on the use of renewable and low-carbon fuels in maritime transport and amending Directive 2009/16/EC // EUR-Lex : [site]. Brussels, 2021. 36 p. URL: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A52021PC0562&qid=1660202496723> (accessed: 10.08.2022).
 5. 2030 Climate Target Plan // European Commission : [site]. Brussels, 2020. URL: https://ec.europa.eu/info/law/better-regulation/have-your-say/initiatives/12265-2030-Climate-Target-Plan_en (accessed: 20.11.2023).
 6. Directive 2009/28/EC of the European Parliament and of the council of 23 April 2009 on the promotion of the use of energy from renewable sources and amending and subsequently repealing Directives 2001/77/EC and 2003/30/EC // Official Journal of the European Union. 2009. Vol. 52. P. 16–62. (L Series ; № 140).
 7. Directive (EU) 2018/2001 of the European Parliament and of the Council on 11 December 2018 on the promotion of the use of energy from renewable sources (recast) // Official Journal of the European Union. 2018. Vol. 61. P. 82–209. (L Series ; № 328).
 8. Green Hydrogen :A guide to Policy Making / International Renewable Energy Agency (IRENA). Abu Dhabi, 2020. 67 p.
 9. *Kantemirov V.* Power engineering 2.0 and “Hydrogen valley” in Russia // Military Review : [site]. 2021. 4 Feb. URL: <https://topwar.ru/179612-jenergetika-20-i-vodorodnaja-dolina-rossii.html> (Accessed: 20.11.2023) (in Russian).
 10. *Akopyan A.* Hydrogen transport in Russia. Myth or nearest future? // Neskuchnye tehnologii : [site]. 2022. 08 Feb. URL: https://itcrumbs.ru/vodorodnyj-transport-v-rossii-mif-ili-blizhajshee-budushhee_70475 (Accessed: 20.11.2023) (in Russian).

References

1. Novelities in the international policy towards mitigation of greenhouse gas emissions from ships and necessary measures in marine industry. Part 1. Analysis of regulatory documents governing the new policy of greenhouse gas emission mitigation / V.V. Magarovsky, V.N. Polovinkin, A.V. Pustoshny, O.V. Savchenko // Transactions of Krylov State Research Centre. 2022. Vol. 4(402). P. 141–156. DOI: 10.24937/2542-2324-2022-4-402-141-156 (in Russian).
2. Novelities in the international policy towards mitigation of greenhouse gas emissions from ships and necessary

11. Marine Methanol: [site]. [Göteborg], 2023. URL: <http://marinemethanol.com> (accessed: 20.11.2023).
12. *Konoplyanik A.* Pure hydrogen from natural gas // *Gazprom* [corporate journal]. 2020. No. 9. P. 20–29. URL: <https://www.gazprom.ru/f/posts/11/338791/gazprom-magazine-2022-09.pdf> (Accessed: 20.11.2023) (in Russian).
13. *Filippov S.P.* Outlook for Russian power engineering // *Gas turbine technologies*. 2022. No. 3(186). P. 2–6 (in Russian).
14. Russia counts on platinum and palladium // *Prime*: [site]. 2022. 08 Feb. URL: <https://1prime.ru/exclusive/20220208/836018040.html> (Accessed: 20.11.2023) (in Russian).

Сведения об авторах

Магаровский Вячеслав Валерьевич, к.т.н., начальник отделения гидродинамики ФГУП «Крыловский государственный научный центр». Адрес: 196158, Россия, Санкт-Петербург, Московское шоссе, д. 44. Тел.: +7 (812) 415-65-05. E-mail: 2_otd@ksrc.ru.

Половинкин Валерий Николаевич, д.т.н., профессор, научный руководитель ФГУП «Крыловский государственный научный центр». Адрес: 196158, Россия, Санкт-Петербург, Московское шоссе, д. 44. Тел.: +7 (812) 386-67-03. E-mail: krylov@ksrc.ru. <https://orcid.org/0000-0003-4044-2551>.

Пустошный Александр Владимирович, член-корреспондент РАН, д.т.н., главный научный сотрудник – консультант ФГУП «Крыловский государственный научный

центр». Адрес: 196158, Россия, Санкт-Петербург, Московское шоссе, д. 44. Тел.: +7 (812) 415-47-99. E-mail: 2_otd@ksrc.ru. <https://orcid.org/0000-0003-4797-2213>.

Савченко Олег Владиславович, к.т.н., генеральный директор ФГУП «Крыловский государственный научный центр». Адрес: 196158, Россия, Санкт-Петербург, Московское шоссе, д. 44. Тел.: +7 (812) 415-46-23. E-mail: krylov@ksrc.ru.

About the authors

Viacheslav V. Magarovsky, Cand. Sci. (Eng.), Head of Hydrodynamic division, Krylov State Research Centre. Address: 44, Moskovskoe sh., St. Petersburg, Russia, post code 196158. Tel.: +7 (812) 415-65-05. E-mail: 2_otd@ksrc.ru.

Valery N. Polovinkin, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Scientific Principal, Krylov State Research Centre. Address: 44, Moskovskoe sh., St. Petersburg, Russia, post code 196158. Tel.: +7 (812) 386-67-03. E-mail: krylov@ksrc.ru. <https://orcid.org/0000-0003-4044-2551>.

Alexander V. Pustoshny, Dr. Sci. (Eng.), Corresponded member of Russian Academy of Science, Principal research scientist – consultant, Krylov State Research Centre. Address: 44, Moskovskoe sh., St. Petersburg, Russia, post code 196158. Tel.: +7 (812) 415-47-99. E-mail: 2_otd@ksrc.ru. <https://orcid.org/0000-0003-4797-2213>.

Oleg V. Savchenko, Cand. Sci. (Eng.), Director General, Krylov State Research Centre. Address: 44, Moskovskoe sh., St. Petersburg, Russia, post code 196158. Tel.: +7 (812) 415-46-23. E-mail: krylov@krylov.ksrc.ru.

Поступила / Received: 29.06.22
Принята в печать / Accepted: 01.12.23
© Коллектив авторов, 2023