

**Европейская экономическая комиссия**

Исполнительный орган по Конвенции
о трансграничном загрязнении воздуха
на большие расстояния

Рабочая группа по стратегиям и обзору**Шестьдесят первая сессия**

Женева, 4–6 сентября 2023 года

Пункт 2 предварительной повестки дня

Ход осуществления плана работы на 2022–2023 годы**Проект руководящего документа по техническим мерам
для сокращения выбросов от судоходства***Резюме*

Настоящий документ представлен Целевой группой по технико-экономическим вопросам для рассмотрения Рабочей группой по стратегиям и обзору. В нем представлена обновленная информация об эффективных средствах сокращения выбросов от морского судоходства. Документ был подготовлен Целевой группой в соответствии с ее пересмотренным мандатом (решение Исполнительного органа 2018/7, приложение, пункт 2 с)^a. Ожидается, что окончательный вариант проекта документа будет направлен Рабочей группой Исполнительному органу для принятия на его сорок третьей сессии (Женева, 11–14 декабря 2023 года).

^a Со всеми решениями Исполнительного органа, упоминаемыми в настоящем документе, можно ознакомиться на сайте <https://unece.org/decisions>.



I. Введение

1. Цель настоящего документа — представить Сторонам Конвенции о трансграничном загрязнении воздуха на большие расстояния и другим заинтересованным кругам самую последнюю информацию об эффективных мерах по сокращению выбросов от морского судоходства и связанных с ними воздействиях на здоровье человека и окружающую среду.
2. В руководящем документе изложены методы ограничения загрязнения, применимые к судам, как во время плавания, так и на стоянке для ограничения выбросов в атмосферу оксидов серы (SO_x), оксидов азота (NO_x), летучих органических соединений (ЛОС), дисперсного вещества (PM), совокупного взвешенного дисперсного вещества (СВДВ), PM₁₀ и PM_{2,5}, включая черный углерод (ЧУ) и полиароматические углеводороды (ПАУ)). Дальнейший анализ и дополнительная информация представлены в соответствующем справочном неофициальном техническом докладе¹.
3. Рекомендуемые методы изложены в настоящем документе в качестве руководства для возможной реализации методов для сокращения выбросов в секторе судоходства, однако приведенный перечень всех существующих и/или перспективных будущих мер не является исчерпывающим. В целом все оцененные методы обеспечивают измеримое сокращение выбросов по сравнению с эталонной технологией при затратах, соразмерных достигнутым сокращениям, и являются технически реализуемыми при определенных конкретных условиях, зависящих от рассматриваемых методов.

II. Определения

4. Ниже приводится список определений терминов, используемых в настоящем документе:

а) «PM» используется в настоящем документе для обозначения СВДВ, поскольку конкретный диапазон размеров частиц не рассматривается. Тем не менее различия между СВДВ и PM могут быть весьма незначительными, поскольку доля представленных в СВДВ фракций PM_{2,5} и PM₁₀, возникающих при сжигании топлива морскими судами, весьма велика. Согласно руководству Совместной программы наблюдения и оценки распространения загрязнителей воздуха на большие расстояния в Европе/Европейского агентства по окружающей среде, по гранулометрическому составу на PM₁₀ приходится 100 % (это означает, что аэродинамический диаметр всех измеренных фракций PM составляет не более 10 мкм), а на PM_{2,5} — 90–93 %. Кроме того, методы измерения для судовых двигателей нередко соответствуют установленным Международной организацией по стандартизации (ISO) стандартам 8178, в соответствии с которыми перед проведением измерений производится разбавление отработавших газов, с тем чтобы включить в них летучие или конденсирующиеся фракции PM;

б) методы сокращения выбросов загрязняющих веществ называются «наилучшими имеющимися методами» (НИМ) и подразделяются на первичные методы, действующие непосредственно на источник, когда они связаны с заменой топлива или модификацией/оптимизацией технологии и процесса сжигания, и вторичные методы, представляющие собой технологии очистки отработанных газов;

в) районы ограничения выбросов (POB) — это географически ограниченные прибрежные районы, в которых вопросы качества воздуха привлекают к себе особое внимание, поэтому на уровне выбросов для плавающих в этих водах

¹ Nadine Allemand and Grégoire Bongrand, “Background informal technical document on maritime shipping emissions, reduction techniques and determination of their costs”, имеется в качестве неофициального документа для пятьдесят восьмой сессии Рабочей группы по стратегиям и обзору (Женева, 14–17 декабря 2020 года), см. https://unece.org/fileadmin/DAM/env/documents/2020/AIR/WGSR/TFTEI_informal_doc_on_shipping_emissions-final-december2020.pdf.

судов установлены жесткие требования. На сегодняшний день созданы РОВ серы и азота, называемые РОВС и РОВА соответственно, в которых действуют требования в отношении предельных значений выбросов морскими судами диоксида серы (SO₂) и NO_x. В настоящее время РОВС и РОВА созданы в Балтийском море, Северном море, прибрежных водах Северной Америки и Карибском море.

III. Справочная информация

5. Международные морские перевозки обслуживают около 80 % объема мировой торговли и представляют собой активный и растущий сектор экономики. В 2019 году объем морских грузоперевозок через все порты Европейского союза был самым высоким за всю историю наблюдений (3530 млн т (Мт)), затем, в 2020 году, он вследствие пандемии коронавирусной болезни (COVID-19) снизился (-7,3 % по сравнению с 2019 годом), а в 2021 году стал вновь расти (-3,6 % по сравнению с 2019 годом)². Наряду с этим, до пандемии COVID-19 также происходил рост показателей пассажироперевозок. Соответствующим образом, из года в год, за исключением случаев экономических или санитарных кризисов, происходило увеличение флота судов, а также потребления топлива ими³.

6. Вследствие такой интенсивной деятельности морские перевозки являются значительным источником выбросов загрязняющих веществ. Выбросы от морского судоходства в основном являются результатом сжигания топлива в главных и вспомогательных двигателях не только во время плавания, но и нахождения судов у причала или их маневрирования в акваториях портов. Кроме того, необходимо учитывать некоторые значительные неорганизованные выбросы летучих органических веществ (в основном ЛОС) во время погрузки-выгрузки наливных грузов, а также выбросы, связанные с использованием хладагентов или кондиционированием воздуха (гидрофторуглеродов (ГФУ)).

7. Хотя по сравнению с другими видами транспорта морской транспорт считается относительно чистым видом транспорта ввиду низкого уровня выбросов парниковых газов (ПГ) на тонну перевозимых грузов, в 2018 году на долю морского транспорта по-прежнему приходилось около 2,9 % всех антропогенных выбросов углекислого газа (CO₂). Несмотря на значительное снижение содержания серы в судовом топливе начиная с 2020 года, связанное с переходом на правила Международной морской организации (ИМО), по сравнению с другими различными видами транспорта морские перевозки по-прежнему являются крупнейшим источником SO₂ на один тонно-километр. Хотя по сравнению с крупными грузовиками при морских перевозках выбросы NO_x на один тонно-километр оказываются несколько ниже, более высоким при таких перевозках является уровень выбросов PM₁₀. Кроме того, наблюдается растущий интерес к решению проблемы выбросов загрязняющих веществ судами в гаванях по причине их близости к густонаселенным районам. В самом деле, вследствие работы двигателей при пониженной нагрузке во время стоянки у причала уровень выбросов может быть выше, чем во время плавания в открытом море. И действительно, в зависимости от типа судна общие объемы выбросов SO₂, NO_x и PM в гаванях оцениваются в диапазоне от нескольких процентов до 20–30 %⁴.

² Eurostat, “Maritime transport of goods – quarterly data”, Statistics explained. Можно ознакомиться по адресу https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Maritime_transport_of_goods_-_quarterly_data#:~:text=860%20million%20tonnes%20of%20goods,the%20third%20quarter%20of%202022.&text=The%20gross%20weight%20of%20goods,the%20same%20quarter%20of%202021 (посещение сайта состоялось в 2022 году).

³ International Maritime Organization (IMO), *Fourth IMO Greenhouse Gas Study: 2020* (London, 2020).

⁴ Там же.

IV. Законодательная база

8. В целях ограничения негативного воздействия морских перевозок на качество воздуха и здоровье человека ИМО в рамках Международной конвенции по предотвращению загрязнения с судов (Конвенция МАРПОЛ, принята в 1973 году) ввела ряд правил, предусматривающих постепенное ужесточение ограничений. Конвенция МАРПОЛ охватывает загрязнение от судоходства в океанах и некоторых конкретных районах, в частности в Средиземном или Балтийском морях, а также в водах Соединенных Штатов Америки. На протяжении многих лет принимались различные протоколы, а в 1997 году было введено приложение VI к МАРПОЛ «Правила предотвращения загрязнения воздуха с судов», которые вступили в силу в 2005 году.

9. По завершении первоначального этапа перехода на применение приложения VI к МАРПОЛ Комитет ИМО по защите морской среды принял поправки к нему. В 2015 году содержание серы в топливе, начиная с 2020 года, в пределах РОВС было ограничено до 0,1 весового процента, а за пределами РОВС — до 0,5 весового процента. В отношении выбросов NO_x для дизельных двигателей с номинальной мощностью более 130 кВт, а также для судов, изготовленных после 1 января 2000 года, или двигателей, подвергшихся коренному переоборудованию после той же даты, были введены предельные значения выбросов (ПЗВ). ПЗВ для NO_x определяются с помощью уровней, которые зависят от номинальной частоты вращения двигателя (до и после 1 января 2011 года). ПЗВ для уровней I и II применяются в зависимости от даты постройки судна или даты коренного переоборудования двигателя (до или после 1 января 2011 года), в то время как уровень III применяется для судов, построенных после 1 января 2016 года и эксплуатируемых в РОВА.

10. Нормативно-правовые акты являются важнейшим фактором для достижения сокращения выбросов и улучшения качества воздуха вдоль береговой линии, а также внутри стран. Следует учитывать тот факт, что около 70 % выбросов от судоходства образуются на расстоянии менее 400 км от берега, и такие выбросы могут быть перенесены на сушу на сотни километров. Исследование 2007 года показало, что судоходство вдоль береговых линий Европы, Восточной и Южной Азии является причиной почти 60 000 преждевременных смертей в год⁵. В другом исследовании сообщается, что к 2030 и 2050 годам можно избежать примерно 4000 и 8000 преждевременных смертей соответственно, если в Европейском союзе будут созданы дополнительные РОВС и приняты соответствующие стандарты для уровня III по NO_x . В одном из последних исследований⁶ была проанализирована эффективность глобальной политики в рамках правил ИМО 2020 года по ограничению содержания серы и созданию РОВС и РОВА в Средиземном море, а также было выявлено, что в Средиземноморском регионе можно избежать более 6000 преждевременных смертей, наступающих в результате воздействия $\text{PM}_{2.5}$, и ежегодно экономить не менее 17 млрд евро на расходах на здравоохранение, в то время как дополнительные инвестиции для внедрения указанных мер в Средиземном море не превысят 5 млрд евро в год.

11. В рамках международного регулирования для портовых зон не установлено никаких конкретных правил, но тем не менее региональные или местные регулирующие органы могут определять для них некоторые нормативные показатели. В регионе Европейского союза Директивой 2012/33/EU⁷ для судов, стоящих у причала, установлен предел содержания серы в топливе, не превышающий 0,1 весового процента. В Калифорнии (Соединенные Штаты Америки) в соответствии с

⁵ James Corbett and others, “Mortality from shipping emissions: a global assessment”, *Environmental Science and Technology*, vol 41, No. 24 (December 2007), pp. 8512–8518.

⁶ Laurence Rouil and others, “ECAMED: A technical feasibility study for the implementation of an Emission Control Area (ECA) in the Mediterranean Sea – Synthesis report” (Paris, French National Institute for Industrial Environment and Risks, 2019).

⁷ Директива 2012/33/EU Европейского парламента и Совета от 21 ноября 2012 года о внесении изменений в Директиву Совета 1999/32/ЕС о содержании серы в топливе морских судов, *Official Journal of the European Union*, L 327 (2012), pp. 1–13.

Положением о топливе для океанских судов с 2014 года установлен предел содержания серы в топливе на уровне 0,1 весового процента для главных и вспомогательных двигателей, а также для котельных агрегатов судов, находящихся в пределах 24 морских миль от береговой линии Калифорнии. Кроме того, в шести калифорнийских портах (Лос-Анджелес, Лонг-Бич, Окленд, Сан-Диего, Сан-Франциско и Порт-Уайнуме) калифорнийским Положением о морских судах, стоящих на причале, предписано использование электроснабжение от береговых источников питания или альтернативных методов ограничения выбросов, за счет которых обеспечивается аналогичное сокращение выбросов (не менее 85–90 % по РМ и NO_x).

V. Наилучшие имеющиеся методы для судов: первичные методы

A. Переход на новые виды топлива

Малосернистые виды топлива

12. Выбросы SO₂ при сжигании топлива прямо пропорциональны содержанию серы в топливе. Начиная с 2020 года был достигнут значительный прогресс благодаря переходу на применение правил из приложения VI к МАРПОЛ, которыми предельный уровень серы снижен с 3,5 весовых процентов до 0,5 весовых процентов. В конкретных морских акваториях, отнесенных к категории РОВС, предельное содержание серы установлено на уровне 0,1 весового процента. Например, переход с судового топлива с содержанием 0,5 весового процента на судовое дизельное топливо с содержанием 0,1 весового процента приведет к сокращению выбросов SO₂ на 80 %. В настоящее время в некоторых высокодистиллятных видах судового топлива, например в мазуте с ультранизким содержанием серы, содержание серы может достигать до 0,001 весового процента.

13. Помимо сокращения выбросов SO₂, переход с мазута на дистиллятное топливо с низким содержанием серы благодаря более низкому содержанию золы позволяет достичь сокращения выбросов РМ на 50–90 %⁸. Благодаря переходу на легкое судовое топливо совокупное сокращение выбросов ЧУ на 0–80 % в зависимости от характеристик двигателя и используемого топлива при среднем сокращении, равном около 30 %, является вполне достижимой задачей⁹.

14. С точки зрения инвестиций переход на мазуты с более низким содержанием серы сказывается только на эксплуатационных расходах, связанных с ценами на топливо. В конце 2022 года после введения ограничивающих содержание серы правил ИМО 2020 среднемировые цены на бункерном рынке на морской средний дистиллятный газойль и мазут с очень низким содержанием серы (VLSFO), представленный смесью различных остаточных и дистиллятных фракций топлива, составляют около 1126 евро за тонну и 754 евро за тонну (при обменном курсе 0,98 евро/долл. США) соответственно. Для сравнения, средние мировые цены на топливо с более высоким содержанием серы, например на промежуточный мазут 380, составляют около 532 евро за тонну.

Сжиженный природный газ

15. Переход с судовых мазутов на использование в судовых дизельных двигателях сжиженного природного газа (СПГ) позволяет значительно снизить выбросы SO₂, NO_x, РМ и ЧУ. По сравнению с другими нефтепродуктами при сжигании СПГ почти не

⁸ Rouil and others, "ECAMED".

⁹ Bryan Comer, "Black carbon and maritime shipping: the long road to regulating a short-lived climate pollutant", *EM: The Magazine for Environmental Managers* (April 2019); и Daniel Lack and others, *Investigation of Appropriate Control Measures (Abatement Technologies) to Reduce Black carbon Emissions from International Shipping*, Air Pollution and Energy Efficiency Studies 1 (London, IMO, 2015).

образуются выбросы SO₂, а их сокращение достигает 90–100 %. Кроме того, при переходе на СПГ достигается снижение выбросов NO_x и РМ, которое варьируется в диапазоне от 64–90 % по NO_x и 60–98 % по РМ в зависимости от характеристик двигателя и используемого топлива¹⁰. Кроме того, при замене обычного судового топлива на СПГ достижимо сокращение выбросов ЧУ на 75–90 %. Тем не менее большинство судовых двигателей, работающих на СПГ, являются двухтопливными (81 % всех установленных или заказанных двигателей на СПГ), поскольку СПГ имеет высокую температуру воспламенения, экологические преимущества, связанные с применением двигателей на СПГ, оказываются более скромными вследствие использования традиционного топлива или дистиллятных фракций топлива.

16. В преддверии введения РОВС, РОВА и ограничений на содержание серы согласно правилам ИМО 2020, а также готовности сектора к декарбонизации интерес к двигателям на СПГ вырос, а доля поставленных судов с двигателями на СПГ в период с 2010 по 2018 годы увеличилась с 1,4 % до 13,5 %. Однако модернизация двигателей для перехода на СПГ предполагает их дорогостоящее переоборудование, при этом в связи с установкой двигателя этого типа требуется дополнительное пространство, составляющее примерно 3–4 % от контейнерместности¹¹.

17. По сравнению с другими типами судов первоначальные инвестиции в строительство нового судна, работающего на СПГ, на 10–20 % выше, что соответствует примерно 1–4 млн евро и в основном обусловлено размерами емкости для хранения СПГ, строительством системы топливных трубопроводов и необходимостью дополнительных мер безопасности¹². В зависимости от размера двигателя и от того, создана ли соответствующая установка на вновь построенном судне или после модернизации, капитальные вложения в двигатели на СПГ варьируются от 219 до 1603 евро на кВт номинальной мощности¹³. С точки зрения эксплуатационных расходов по сравнению с двигателями, работающими на традиционном мазуте, экономия топлива при использовании СПГ достигает 5–10 %. Кроме того, переход с газойля на СПГ, по оценкам, окажет положительное влияние на цену топлива, оцениваемое примерно в 8 % при том же объеме выработанной энергии.

18. При использовании СПГ потенциальным существенным недостатком является риск проскока метана, что приводит к увеличению выбросов ПГ. С точки зрения выбросов CO₂ использование СПГ выгодно по сравнению с традиционными мазутами, поскольку содержание углерода в СПГ на 25–28 % ниже; кроме того, данная мера обеспечивает некоторую экономию топлива.

19. Более того, объем выбросов метана, образующихся при сжигании СПГ, аналогичен объему его выбросов при сжигании обычных мазутов. Однако при оценке выбросов метана от судоходства в связи с использованием СПГ к вопросу о выбросах следует принять более широкий подход и учитывать выбросы, образующиеся при производстве и транспортировке СПГ (в рамках оценки жизненного цикла (ОЖЦ)), а также вышеупомянутый проскок метана при использовании СПГ, соответствующий количеству природного газа, проходящего через двигатель без сгорания. Проскок метана оценивается как относительно небольшой для двигателей, работающих по дизельному циклу, хотя он может стать довольно значительным для двигателей, работающих по циклу Отто и в среднем оценивается примерно в пределах 2–5 % от

¹⁰ Hulda Winnes and others, “Evaluation, control and Mitigation of the EnviRonmental impacts of shippinG Emissions (EMERGE). Deliverable 1.1, ‘Summary and analysis of available methods for SO_x, NO_x and PM, together with data on emissions, waste streams, costs and applicability”, можно ознакомиться по адресу <https://cordis.europa.eu/project/id/874990/results>.

¹¹ IMO, *Studies on the Feasibility and Use of LNG as a Fuel for Shipping*, Air Pollution and Energy Efficiency Studies 3 (London, 2016).

¹² Jørgen Jordal-Jørgensen, *Reducing Air Pollution from Ships: A Cost Benefit Analysis and Feasibility Study on Possible Means for Further Reduction of Emissions – Environmental Project No. 1421 (2012)* (Copenhagen, Danish Ministry of the Environment – Environmental Protection Agency (EPA), 2012).

¹³ Stefan Åström and others, “The costs and benefits of a nitrogen emission control area in the Baltic and North Seas”, *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, vol. 59 (March 2018), pp. 223–236.

расхода топлива¹⁴. По этому вопросу изготовители добились прогресса благодаря использованию принципа сжигания обедненного топлива¹⁵, совершенствованию конструкции двигателей или применению передовых контрольно-измерительных систем.

Биодизельное топливо и биотопливо

20. Переход на биодизельное топливо или биотопливо является эффективным способом декарбонизации судоходного сектора и в последнее время он вызывает все больший интерес. Для полной оценки сокращения выбросов CO₂ необходимо провести ОЖЦ по всей производственно-сбытовой цепочке, поскольку выгоды могут оказаться нивелированы «изменениями в землепользовании», связанными с производством биотоплива. Тем не менее при применении подхода, основанного на ОЖЦ, благодаря использованию биотоплива был достигнут не только значительный прогресс в декарбонизации, но и в снижении выбросов парниковых газов на 70–100 %¹⁶. С точки зрения ОЖЦ к наиболее устойчивым видам биотоплива относятся биодизельное топливо на основе метиловых эфиров жирных кислот, гидроочищенные растительные масла, дизельное топливо, полученное по методу Фишера-Тропша, диметиловый эфир (ДМЭ) и биометанол.

21. Кроме того, по сравнению с обычными мазутами наблюдается снижение РМ на 12–70 %, доля которого зависит от процентного содержания биотоплива в конечной топливной смеси¹⁷. Аналогичным образом наблюдается снижение выбросов ЧУ на 38–75 %¹⁸. Кроме того, при использовании биотоплива по сравнению с мазутом ожидается некоторое снижение выбросов SO₂.

22. Поскольку биотопливо имеет более низкое энергосодержание, чем мазут, ожидается, что расход топлива при том же количестве вырабатываемой энергии будет на 8–11 % выше, что, соответственно, приведет к увеличению эксплуатационных расходов судовладельцев. Кроме того, цены на биотопливо во всем мире превышают цены на обычные мазуты, и в зависимости от вида биотоплива и способа его производства они варьируются от +30 % до почти трехкратного роста. В зависимости от используемого биотоплива могут потребоваться некоторые модификации двигателя (например, для ДМЭ), что увеличивает необходимые общие инвестиции, в то время как другие виды биотоплива уже совместимы с существующими двигателями (например, гидратированные растительные масла или дизельное топливо, полученное по методу Фишера-Тропша). Наконец, возможный рост спроса на биотопливо в будущем может привести к некоторым ограничениям в производственных мощностях и, соответственно, в наличии биотоплива для конечного использования, особенно в случае роста спроса в других секторах и на других видах транспорта, что вызовет необходимость дальнейшего развития инфраструктуры поставок.

Метанол и диметиловый эфир

23. Метанол и диметиловый эфир являются другими возможными заменителями обычных мазутов. Поскольку эти виды топлива имеют очень низкое содержание серы, выбросы SO₂ наряду с выбросами РМ могут быть резко сокращены, причем

¹⁴ International Renewable Energy Agency (IRENA), *A Pathway to Decarbonize the Shipping Sector by 2050*, (Abu Dhabi, 2021).

¹⁵ Топливо, разбавленное избыточным количеством воздуха по сравнению со стехиометрическим соотношением воздуха к топливу, необходимым для сжигания единицы массы топлива.

¹⁶ IRENA, *A Pathway*.

¹⁷ Francesco Di Natale and Claudia Carotenuto, “Particulate matter in marine diesel engines exhausts: Emissions and control strategies”, *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, vol. 40 (October 2015), pp. 166–191.

¹⁸ Lack and others, *Investigation of Appropriate Control Measures*.

наблюдаемое сокращение составляет более 90 %¹⁹. Кроме того, переход на метанол или ДМЭ позволяет добиться снижения выбросов NO_x на 30–60 %²⁰.

24. В сценарии, по которому топливо из метанола или ДМЭ производится на основе биомассы, например из остатков биомассы или путем газификации черного щелока, можно ожидать значительного сокращения выбросов CO₂, достигающего 95–100 %. Однако, как и в случае с биотопливом, для оценки потенциальных недостатков и выбросов CO₂, связанных с производством метанола из биомассы, следует прибегнуть к ОЖЦ. В сценарии, при котором топливо из метанола или ДМЭ производится из ископаемого топлива, по сравнению с выбросами от сжигания обычного морского судового топлива можно достичь только умеренного снижения выбросов CO₂.

25. Поскольку метанол и ДМЭ имеют более низкое энергосодержание, после перехода на новое топливо ожидается увеличение расхода топлива примерно на 9 %. Кроме того, стоимость топлива из метанола или из произведенного из биомассы ДМЭ превышает стоимость VLSFO в пределах от 36 % до более чем в трехкратном размере, при этом в случае «зеленого» электронного метанола она суммируется со стоимостью энергии биомассы, используемой для хранения улавливаемого углерода; таким образом стоимость этого вида топлива, как ожидается, окажется в 3,4–6,8 раза выше. Однако, согласно ожиданиям, к 2050 году стоимость возобновляемого электронного метанола значительно снизится и по сравнению с текущей ценой на VLSFO может упасть примерно в 2,5–3,4 раза. Вместе с тем с использованием метанола связаны и другие эксплуатационные расходы, обусловленные требованиями к безопасности, связанными с подачей в емкости с метанолом азота в качестве инертного газа, а также с расходами на обучение персонала управлению повышенными рисками. Кроме того, затраты на техническое обслуживание оцениваются примерно в 3–4 евро за каждый выработанный МВтч. Наконец, стоимость новых двигателей, совместимых с метанолом, а также существующих модернизированных двигателей выше стоимости обычных двигателей, при этом дополнительные инвестиции оцениваются в 150–225 евро на кВт для новых двигателей и 225–450 евро на кВт для модернизированных двигателей²¹.

Водород

26. В последние несколько лет в контексте целей по достижению углеродной нейтральности освоение водорода в качестве топлива привлекает все большее внимание. В самом деле, если водород производится путем электролиза воды, а электричество вырабатывается с помощью возобновляемых источников энергии или на атомных электростанциях, то в результате получается топливо, не содержащее CO₂. Водород можно использовать либо в топливных элементах, либо в двухтопливных двигателях, либо для замены тяжелого мазута в дизельных двигателях. При использовании топливных элементов в результате электрохимической реакции между водородом и кислородом выделяется только тепло и вода, что сводит к нулю выбросы отработавших газов судов.

27. Однако по сравнению с использованием традиционного топлива использование водорода имеет свои недостатки, включая главный из них — необходимость в дополнительном пространстве. Фактически, по сравнению с тяжелым мазутом использование водорода требует в пять раз большего объема емкостей, если он находится в жидком состоянии, и в 10–15 раз большего объема при его газообразном состоянии²², поскольку из-за высокой воспламеняемости водорода (H₂) необходимы специальные решения для хранения водорода и соблюдения процедур безопасности.

¹⁹ Joanne Ellis and Martin Svanberg, “Expected benefits, strategies, and implementation of methanol as a marine fuel for the smaller vessel fleet. SUMMETH - Sustainable Marine Methanol Deliverable D5.1.”, Final Report No. D5.1 (n.p., 2018).

²⁰ DNV GL, “Methanol as marine fuel: Environmental benefits, technology readiness, and economic feasibility”, Report No. 2015-1197, rev. 2 (n.p., 2016).

²¹ Winnes and others, “Evaluation, control and Mitigation”.

²² Marketa Pape, “Decarbonizing maritime transport: the EU perspective”, Briefing (European Parliamentary Research Service, 2020).

Кроме того, говоря о готовности технологии, следует отметить, что водородные топливные элементы для судоходства все еще находятся на стадии разработки, а текущие технические решения больше подходят для малых и средних судов, например для паромов или пассажирских судов. Наконец, при увеличении спроса в различных секторах могут возникнуть некоторые ограничения в доступности водорода, производимого на основе возобновляемой электроэнергии, с учетом того, что в 2019 году производство «зеленого» водорода составляло всего 4 % от общего объема производства²³; например, для обеспечения всего сектора морских перевозок производство H₂ потребуется увеличить в три раза.

28. Наконец, имеется лишь ограниченная информация об оценке необходимых дополнительных инвестиций по сравнению с обычными дизельными двигателями. Стоимость оборудования для электролиза оценивается в 650–1000 дол. США на кВт (606–933 евро на кВт по обменному курсу на середину 2022 года). Стоимость производства «зеленого» H₂ в 2020 году колебалась в пределах от 126 до 144 евро за МВтч с учетом средней цены на электроэнергию в размере 60 евро за МВтч²⁴. Однако с развитием производства возобновляемой энергии и ростом спроса ожидается, что к 2030 году «зеленый» H₂ по сравнению с СПГ и VLSFO достигнет конкурентоспособности по цене.

Аммиак

29. Аммиак (NH₃) является безуглеродным веществом, поэтому использование аммиака в качестве топлива позволяет избежать выбросов CO₂, что представляет большой интерес в процессе декарбонизации отрасли. Однако глобальный углеродный след аммиака усугубляется тем, что его производство является высокоэнергоемким, и 90 % его производства по-прежнему обеспечивается за счет ископаемого топлива. Тем не менее потенциал для производства «зеленого» аммиака растет.

30. Одним из ограничений для использования аммиака в качестве топлива является его токсичность, поэтому, несмотря на многочисленные текущие пилотные и исследовательские проекты, в эксплуатацию еще не введено ни одного судна, работающего на аммиаке. Кроме того, по сравнению с водородом аммиак имеет более высокую температуру сжижения (–33 °C), а также более высокую плотность жидкости, что упрощает и удешевляет его хранение. Из этого следует, что получаемый объем топлива в 1,6–2,3 раза больше по сравнению с обычными мазутами. Более того, инфраструктура для хранения и транспортировки аммиака уже существует во всем мире.

31. В настоящее время себестоимость производства «зеленого» аммиака составляет 133–205 евро за МВтч, хотя ожидается, что к 2050 году она значительно снизится и составит 62–107 евро за МВтч, вследствие чего он окажется дешевле VLSFO²⁵. Еще одним существенным фактором, который необходимо учитывать, является стоимость бункеровочных установок, поскольку существующая бункеровочная инфраструктура не совместима с хранением аммиака.

Резюме

32. В таблице ниже приведены данные об ожидаемом сокращении выбросов, увеличении расхода топлива и соответствующих затратах на реализацию некоторых вариантов перехода на альтернативные виды топлива.

²³ DNV GL, “Comparison of alternative marine fuels”, Report No. 2019-0567, rev. 4 (n.p., 2019).

²⁴ IRENA, *A Pathway*.

²⁵ Там же.

Сокращение выбросов (в процентах) в разбивке по методу перехода на альтернативные виды топлива

Первичные методы перехода на альтернативные виды топлива					Увеличение расхода топлива	Инвестиционные затраты (евро/кВт)	Затраты на эксплуатацию и техническое обслуживание (евро)
	SO ₂	NO _x	PM	ЧУ			
Переход на топливо с низким содержанием серы	До 99 %	–	50–90 %	0–80 % (медиана: 30 %)	–	–	222–594 за т топлива
Переход на СПГ	90–100 %	64–90 %	60–98 %	75–90 %	–5–10 %	219–1 603	–43 за т топлива (+ экономия топлива)
Переход на водотопливные эмульсии	–	1–60 %	20–90 %	0–85 %	+0–2 %	11–44	33 000–271 000 в год
Переход на биодизельное топливо и биотопливо	–	–	12–70 %	38–75 %	+8–11 %	–	–
Переход на метанол	100 %	30–60 %	90–99 %	97 %	+9 %	150–450	10–15 за МВтч на топливо и 3–4 за МВтч на другие эксплуатационные и ремонтные расходы

В. Модификация сжигания

Водотопливные эмульсии

33. Использование стабильного раствора воды в топливе (WiFE) или впрыск воды непосредственно в камеру сгорания снижает температуру сгорания, и, следовательно, образование термических NO_x также снижается на 1–60 % в зависимости от содержания воды²⁶. Кроме того, при использовании WiFE можно добиться сокращения выбросов PM на 20–90 %, а также сокращения выбросов ЧУ до 85 %²⁷.

34. Использование WiFE, как правило, увеличивает расход мазута, хотя увеличение ее расхода незначительно, когда содержание воды не превышает 30 %, и оценивается примерно в 1–2 % для более высоких значений содержания воды. Использование WiFE в существующих судовых двигателях предполагает тщательное рассмотрение возможностей впрыска топлива при сохранении прежнего уровня выходной мощности. Кроме того, следует тщательно учитывать риск образования серной

²⁶ Incentive Partners and Litehauz, *Economic Impact Assessment of a NO_x Emission Control Area in the North Sea: Environmental Project No. 142. (2012)* (Copenhagen, Danish Ministry of the Environment – EPA, 2012).

²⁷ James J. Corbett, James J. Winebrake and Erin H. Green, “An assessment of technologies for reducing regional short-lived climate forcers emitted by ships with implications for Arctic shipping”, *Carbon Management*, vol. 1, No. 2 (2010), pp. 207–225.

кислоты, поскольку она может привести к нежелательным последствиям в виде коррозии двигателя.

35. Капитальные вложения, связанные с использованием WiFE, составляют примерно 11–44 евро на кВт, в зависимости от того, является ли двигатель модернизированным или новым, а также от его размера²⁸. Годовые затраты на эксплуатацию и техническое обслуживание оцениваются примерно в 9–9,5 евро на кВт в год²⁹.

Метод применения скользящих клапанов

36. Модификации сжигания топлива — еще один метод снижения выбросов от судоходства. Модификация процесса сжигания путем внедрения скользящих клапанов взамен обычных топливных клапанов обеспечивает более полное сгорание при более низких температурных пиках пламени. При более низких температурах сгорания уменьшается образование термических NO_x, и снижение их выбросов может достигать до 20 %. Наблюдаются и другие сопутствующие выгоды по выбросам РМ и ЧУ, при этом их возможное сокращение составляет 10–50 % (в среднем 25 %) для РМ и 25–50 % для ЧУ³⁰. Однако внедрение скользящих клапанов предполагает увеличение расхода топлива на 2 %, что влечет за собой дополнительные выбросы CO₂ и SO₂, а также дополнительные расходы.

37. Инвестиционные затраты, связанные с внедрением скользящих клапанов, относительно умеренные, стоимость каждого клапана оценивается примерно в 230 евро, что приводит к дополнительным затратам на выработанную электроэнергию, оцениваемым в 0,33–1,43 евро на кВт/год³¹. Более того, в отличие от других методов сокращения выбросов с золотниками не связаны дополнительные расходы на эксплуатацию и техническое обслуживание.

С. Регулировка гребной установки

Метод движения «на малых парах»

38. Метод движения «на малых парах» заключается в снижении крейсерской скорости для экономии топлива, поскольку расход топлива приблизительно пропорционален значению скорости судна, возведенной в третью степень. Так, например, снижение крейсерской скорости с 23 узлов до 18 узлов (–21,7 %) может обеспечить снижение расхода топлива на 50 %, в то время как снижение скорости на 10 % и 20 %, как сообщается, приводит к экономии топлива на 15–19 % и 36–39 % соответственно. Выбросы SO₂ и CO₂ прямо пропорциональны расходу топлива, поэтому за счет снижения крейсерской скорости можно добиться значительного сокращения выбросов. Одновременно при снижении скорости примерно на 50 % экономия топлива во время крейсерского хода позволяет снизить выбросы NO_x и РМ на 64 % и 69 % соответственно³². Кроме того, за счет снижения выходной мощности двигателя (т. е. при его регулировке, позволяющей снизить его выходную мощность по сравнению с нормальными условиями эксплуатации) достижимо сокращение выбросов ЧУ до 30 %. Однако при более низких значениях нагрузки двигателя выбросы ЧУ могут увеличиваться даже без снижения выходной мощности. В то же время более низкие значения нагрузки на двигатель негативно сказываются на выбросах окиси углерода (CO).

²⁸ Lack and others, *Investigation of Appropriate Control Measures*.

²⁹ Jordal-Jørgensen, *Reducing Air Pollution from Ships*.

³⁰ Bryan Comer and others, *Black carbon emissions and fuel use in global shipping: 2015* (n.p., International Council on Clean Transportation, 2017).

³¹ Corbett and others, “An assessment of technologies”.

³² J. Wayne Miller and others, *In-use Emissions Test Program at VSR Speeds for Oceangoing Container Ship: Report* (n.p., California Air Resources Board, 2012).

39. С точки зрения стоимости основным последствием внедрения метода движения «на малых парах», с которым судовладельцы вынуждены считаться, является увеличение сроков доставки. Поэтому необходимость в дополнительных судах для компенсации увеличения сроков доставки, не только сведет на нет экологические преимущества, но и негативно скажется на экологической результативности. Одно из исследований³³ показало, что применение метода движения «на малых парах» в территориальной морской зоне Европейского союза (в пределах 12 морских миль от береговой линии) или в исключительной экономической зоне (т. е. 12–200 морских миль от береговой линии) в 2030 году может привести к экономии топлива до 410 млн евро и 3447 млн евро соответственно (без учета дополнительного технического обслуживания или изменения размера флота судов). В другом исследовании³⁴ сообщается, что для категории судов вместимостью 4000 единиц двадцатифутового эквивалента³⁵ (ДФЭ) снижение скорости с 23 узлов до 17 узлов уменьшает вклад бункерного топлива в общие эксплуатационные расходы с 68 % до 51 % при работе на мазуте (промежуточный мазут 380) и с 77 % до 62 % при работе на морском газойле. Наконец, переоборудование двигателя на двигатель с электронным регулированием потребует дополнительных инвестиций, которые для двигателя мощностью 9,5 МВт оцениваются примерно в размере 71 евро на кВт.

Суда с питанием от аккумуляторов (электрические или гибридные)

40. Возрос интерес к использованию судов с аккумуляторными батареями для морских перевозок на короткие расстояния, при которых требуются частые остановки и имеется более доступная соответствующая инфраструктура. Например, после 2015 года, Норвегия осуществила электрификацию своих паромов. В свете процесса декарбонизации сектора гибридные/электрические суда представляют большой интерес, при этом для гибридных судов снижение выбросов CO₂ может составить 10–40 %, в то время как для полностью электрических судов возможно полное исключение выбросов CO₂ в случае выработки электроэнергии из возобновляемых или ядерных источников. Кроме того, генерация отработавших газов осуществляется не в судовых двигателях, а на теплоэлектростанции, где установлено гораздо более эффективное оборудование для борьбы с загрязнителями воздуха.

41. Однако следует учитывать, что установка аккумуляторных систем, срок службы которых составляет около 8–10 лет, делает это оборудование значительно более дорогостоящим вариантом по сравнению с дизельными двигателями. Более того, с точки зрения выбросов CO₂ на начальном этапе для оценки выбросов CO₂ было бы полезно рассмотреть этот вопрос с точки зрения более широкой перспективы с привлечением ОЖЦ по аналогии с практикой, применимой к производству электроэнергии или аккумуляторных батарей.

Помощь ветровой тяги

42. Использование ветровой тяги для снижения расхода топлива также вызывает повышенный интерес. Первыми прототипами, находящимися на стадии испытаний, являются роторные паруса, паруса-крылья и буксировочные змеи. В зависимости от применяемой технологии, типа судна и метеорологических условий можно ожидать экономии топлива до 50 %, хотя в среднегодовом выражении экономия на испытанных судах составляет около 8–10 %³⁶. В одном конкретном случае было заявлено, что если применить технологию роторного паруса ко всему мировому танкерному флоту, то

³³ Paul Campling Liliene Janssen and Kris Vanherle, *Specific Evaluation of Emissions from Shipping Including Assessment for the Establishment of Possible New Emission Control Areas in European Seas*, (n.p., Flemish Institute for Technological Research NV, 2012).

³⁴ C. Chrysopoulos and M. Nijdam, “The effect of the revised 1999/32/EC directive on the liner service design in container shipping market” (n.p., 2012).

³⁵ Единица, используемая для определения грузоподъемности контейнеровозов.

³⁶ Jon Excell, “The rise of the wind ships”, *The Engineer*, 19 February 2020. Можно ознакомиться по адресу www.theengineer.co.uk/content/in-depth/the-rise-of-the-wind-ships/.

выбросы CO₂ могут сократиться более чем на 30 млн т, что составляет около 3 % от общего объема выбросов парниковых газов при морских перевозках.

43. Тем не менее необходимо учитывать некоторые ограничения ветровой тяги, связанные, например, с планировкой палубы, процессами загрузки и увеличением крена судна. Кроме того, являющиеся наиболее распространенными решениями использования ветровой тяги воздушные змеи и роторные паруса, по оценкам, более эффективны при более низких скоростных режимах (например, ниже 16 узлов для воздушных змеев)³⁷.

VI. Наилучшие имеющиеся методы для судов: вторичные методы

Мокрые скрубберы

44. Принцип работы мокрых скрубберов основан на пропускании потока отработавших газов через жидкий щелочной раствор (например, морскую воду или химический раствор), который посредством химических реакций нейтрализует SO_x, присутствующий в отработавших газах. Существует три типа мокрых скрубберов:

а) скрубберы открытого цикла: морская вода закачивается и используется в качестве щелочного раствора для нейтрализации соединений SO_x с образованием серной кислоты. При использовании 3,5 весовых процентов мазута необходимый расход промывочной воды находится в пределах 45–60 м³/МВтч³⁸. Затем сточные воды, прошедшие надлежащую очистку, сбрасываются в море;

б) скрубберы замкнутого цикла: в этой системе пресная вода, смешанная с добавлением щелочных химикатов (например, гидроксида натрия), используется для реакции с SO_x и образования сульфата натрия. Затем сточные воды проходят через резервуар для очистки, после чего их вновь подают в скруббер. Необходимый расход воды ниже, чем в случае систем с открытым контуром, и составляет около 20–30 м³/МВтч, а на работу системы водоснабжения приходится около 0,5–1 % мощности двигателя³⁹. Такая конфигурация особенно полезна для судов, курсирующих в морских водах с низкой щелочностью или в тех районах, где сброс воды запрещен;

в) гибридные скрубберы: технология сочетает в себе скрубберы открытого и закрытого типа и обеспечивает судам гибкость и адаптируемость к условиям/ограничениям морей, в которых они плавают.

45. Установка мокрых скрубберов позволяет снизить судовые выбросы до 98 % по SO₂, до 90 % по РМ при среднем уровне их сокращения около 30 % и до 70 % по ЧУ при среднем наблюдаемом сокращении его выбросов в диапазоне 16–37 % в зависимости от используемого топлива, типа двигателя и условий эксплуатации, включая условия эксплуатации скруббера (т. е. размеры установки, время пребывания в скруббере отработавших газов и расход реагентов)⁴⁰. Внедрение скрубберов предполагает увеличение расхода топлива на 0,5–3 % в зависимости от ожидаемого уровня выбросов отработавших газов, марки используемого топлива, типа и конструкции скруббера, а также характеристик двигателя, что косвенным образом приводит к некоторому увеличению выбросов CO₂.

46. Преимуществом скрубберов является их совместимость с системами рекуперации отработанного тепла или другими системами очистки отработавших газов, например с рециркуляцией отработавших газов (РОГ), избирательным

³⁷ Päiva Aakko-Saksa and Kati Lehtoranta, *Ship Emissions in the Future: Review*, Research Report No. VTT-R-00335-19 (n.p., VTT Technical Research Centre of Finland, 2019).

³⁸ Lloyd's Register, *Understanding Exhaust Gas Treatment Systems. Guidance for Shipowners and Operators* (London, 2012).

³⁹ Там же.

⁴⁰ Winnes and others, "Evaluation, control and Mitigation"; и MAN Diesel and Turbo, *MAN B&W Two-stroke Marine Engines - Emission Project Guide for Marpol Annex VI Regulations* (n.p., 2018).

каталитическим восстановлением (ИКВ), расположенными ниже скруббера по потоку, а также с технологиями удаления РМ. Тем не менее для установки скруббера возникают некоторые ограничения, и, в частности, это касается требований к пространству, поскольку объем установки может варьироваться от около 65 м³ для небольших двигателей до более чем 800 м³ для больших установок⁴¹. В частности, в случае систем с замкнутым циклом требуется дополнительное пространство для блоков очистки и хранения сточных вод, а также для оборудования емкости для хранения реагентов.

47. Внедрение скрубберов сопряжено с большими затратами: капитальные вложения составляют от 100 до 433 евро на кВт в зависимости от типа скруббера, выбора в пользу новой установки или модернизации. В частности, стоимость скрубберов с открытым контуром составляет 100–216 евро на кВт, а стоимость скрубберов с закрытым контуром — 200–433 евро на кВт в зависимости от размера двигателя и конструкции скруббера⁴². В пилотных проектах гибридные скрубберы встречаются реже, но в одном из описанных случаев капитальные затраты на такую установку составили около 225 евро на кВт при строительстве нового судна и 338 евро на кВт при модернизации⁴³. Кроме того, если в случае скрубберов с открытым контуром учитываются только эксплуатационные затраты на повышенное потребление топлива, то в случае систем с замкнутым контуром наряду с увеличением расхода топлива, необходимо также рассчитывать затраты на гидроксид натрия и воду, а также на утилизацию шлама, что в сумме составляет около 6–11 евро на МВтч⁴⁴. Наконец, затраты на техническое обслуживание оцениваются примерно в пределах 0,6–0,9 за МВтч для скрубберов с открытым контуром и 0,3–1,2 евро за МВтч для установок с закрытым контуром⁴⁵. В целом, учитывая весь срок службы скруббера, ожидается, что затраты на эксплуатацию и техническое обслуживание для обоих типов скрубберов составят около 2–3 % от общих инвестиционных затрат.

48. В период эксплуатации скрубберов, в зависимости от используемого топлива, степени очистки воды и добавляемых химикатов в сточные воды могут попадать такие опасные вещества, как сера, ПАУ, тяжелые металлы и нитраты⁴⁶. Кроме того, сточные воды скрубберов характеризуются низкими значениями pH и высокими температурами. Поэтому к сбросу сточных вод в морские воды применяются специальные правила для предотвращения их негативного воздействия, например подкисление, а также введены соответствующие требования по значениям pH и концентрации ПАУ, нитратов и частиц. По этой причине в ряде портов и отдельных районах мира был введен запрет на сброс сточных вод (например, в Китае, Сингапуре, Бельгии, Ирландии, Калифорнии, Суэцком канале, Панамском канале, немецкой части реки Рейн).

Системы сухой очистки отработавших газов

49. Системы сухой очистки отработавших газов (ССООГ) также были адаптированы к морским двигателям и реализовали свой потенциал в снижении выбросов SO₂. Принцип работы аналогичен принципу работы мокрых скрубберов, но вместо впрыска жидкого раствора в скрубберную установку непосредственно в канал отработавших газов для реакции с соединениями SO_x и образования твердого сульфата

⁴¹ MAN Diesel and Turbo, “MAN B&W”.

⁴² Peter Bosch and others, “Cost Benefit Analysis to support the impact assessment accompanying the revision of Directive 1999/32/EC on the sulfur content of certain liquid fuels”, AEA/ED45756/Issue 3 (n.p., AEA, 2009); and Åström and others, “The costs and benefits of a nitrogen emission control area”.

⁴³ Janusz Cofala and others, “The potential for cost-effective air emission reductions from international shipping through designation of further Emission Control Areas in EU waters with focus on the Mediterranean Sea” (n.p., International Institute for Applied Systems Analysis, 2018).

⁴⁴ Eelco Den Boer and Maarten't Hoen, *Scrubbers: An Economic and Ecological Assessment* (Delft, CE Delft, 2015).

⁴⁵ Winnes and others, “Evaluation, control and Mitigation”.

⁴⁶ Christer Ågren, “Environmental impacts of ship scrubbers”, *Acid News*, No. 3 (October 2019), pp. 17–18.

или карбоната натрия могут вводиться порошкообразный бикарбонат натрия или гранулы гидроксида кальция. Затем отработавшие газы проходят через оборудование для удаления РМ, например через рукавный фильтр, для удаления продуктов реакции, а также образовавшихся в результате горения сажи, ЧУ и тяжелых металлов, которые в конечном итоге сбрасываются в соответствующий контейнер.

50. ССООГ позволяют достичь снижения выбросов SO_x более чем на 99 %, а также аналогичного снижения выбросов РМ (как по концентрации, так и по массе)⁴⁷. По сравнению со скрубберами открытого цикла преимущество технологии ССООГ заключается в отсутствии необходимости сбрасывания сточных вод в море, при этом по сравнению с установками закрытого цикла образуется меньший объем остатков. Кроме того, потребление энергии, необходимой для работы, находится на довольно низком уровне, при этом отсутствует риск коррозии. По сравнению с мокрыми скрубберами преимущество рукавных фильтров с впрыском бикарбоната натрия заключается в низком потреблении электроэнергии, а увеличение расхода топлива оценивается в пределах примерно 0,2–0,3 %. Более того, по сравнению с дизельными сажевыми фильтрами (ДСФ) перепад давления в рукавных фильтрах существенно не увеличивается. Для скрубберов замкнутого цикла для хранения реактивов и остатков необходимо дополнительное пространство. Такая система совместима с ИКВ или РОГ. Отсутствует информация об экономических аспектах применения этой технологии, и для ее более широкого внедрения необходимо проведение дальнейших разработок. Она уже была опробована в нескольких пилотных проектах, однако для повышения ее надежности применительно к судоходству и оценки соответствующих инвестиций требуется провести дополнительную работу.

Рециркуляция отработавших газов

51. Системы рециркуляции отработавших газов (РОГ) служат для возвращения отработавших газов двигателя обратно в камеру сгорания после их очистки для снижения температуры и давления при сгорании и недопущения образования термических NO_x . Температура отработавших газов и содержание кислорода в них снижается при их пропускании через охладитель, при этом увеличивается их теплоемкость, а расположенный ниже по потоку сажевый фильтр (или скруббер) удаляет остатки сгорания и предотвращает коррозию или засорение двигателя. Для работы системы РОГ необходима электронная система регулирования.

52. Эффективность удаления NO_x системой РОГ зависит от скорости рециркуляции: так, в дизельных двигателях наблюдалось снижение выбросов на 25–80 %⁴⁸. В некоторых современных системах РОГ, применяемых для двухтактных двигателей, обеспечение соблюдения ограничений по NO_x для уровня III МАРПОЛ может быть достигнуто при 40-процентном уровне рециркуляции. Однако в среднескоростных двигателях необходимо продемонстрировать соблюдение установленных ограничений, при этом основными проблемами являются высокие концентрации SO_2 и РМ в дымовых газах. Внедрение установок РОГ приводит к снижению мощности двигателя, а также к увеличению расхода топлива до +4 %, что влечет за собой увеличение выбросов CO_2 . Более того, если работа системы РОГ не будет налажена должным образом, ее применение может привести даже к увеличению выбросов CO и РМ.

53. С точки зрения оценки затрат инвестиции, необходимые для РОГ, вполне разумны, а наиболее значительная часть инвестиционных затрат приходится на стоимость аппаратуры для контроля за рециркуляционным потоком. В целом, капитальные вложения оцениваются в 36–60 евро на кВт в зависимости от желаемой

⁴⁷ International Maritime Organization, “Evaluation and harmonization of rules and guidance on the discharge of liquid effluents from EGCS into waters, including conditions and areas”, submission to seventy-fifth session of the Marine Environment Protection Committee, document MEPC 75/INF.13.

⁴⁸ Giannis Papadimitriou and others, *Best Available Techniques for Mobile Sources in Support of a Guidance Document to the Gothenburg Protocol of the LRTAP Convention* (n.p., European Commission, 2015).

скорости рециркуляции и уровня снижения выбросов NO_x ⁴⁹. Эксплуатационные расходы колеблются в диапазоне от 17 до 25 евро на кВт, а с учетом затрат на техническое обслуживание общие расходы можно оценить примерно в 1–3 евро за МВтч⁵⁰. Внедрение РОГ подразумевает увеличение расхода топлива в размере 1–2 %, которое может быть компенсировано некоторой экономией топлива при переводе двигателя с уровня II на уровень I.

Избирательное каталитическое восстановление;

54. Избирательное каталитическое восстановление (ИКВ) является надежной и зрелой технологией, применяемой в промышленном секторе и морских перевозках, которая позволяет значительно сократить выбросы NO_x до уровня III. Принцип работы ИКВ состоит в том, чтобы вызвать химическую реакцию в присутствии катализатора путем введения азотвосстанавливающих соединений, например водного раствора аммиака (NH_3) или мочевины в канал для отвода отработавшего газа; на выходе в качестве продуктов реакции с присутствующими в отработавшем газе NO_x получают азот (N_2) и воду (H_2O). Наиболее распространенным восстановителем является 40-процентный водный раствор мочевины. В зависимости от условий работы двигателя внедрение установок ИКВ позволяет добиться снижения выбросов NO_x на 70–95 %⁵¹. При использовании катализатора окисления для окисления остаточного NH_3 можно также получить сопутствующие выгоды, связанные с сокращением выбросов ЛОС, СО и РМ, которые оцениваются в 50–90 %, 50–90 % и 10–40 % соответственно⁵².

55. Однако использование технологии ИКВ предполагает увеличение расхода топлива примерно на 2 %, что очевидным образом отрицательно сказывается на выбросах судов. Кроме того, для подачи восстановителя, сжатого воздуха и тепла требуется дополнительная мощность около 5 кВт на МВт мощности двигателя. С точки зрения выбросов применение ИКВ сопряжено с риском утечки аммиака, который увеличивается по мере износа ИКВ. Однако для минимизации возрастания такого риска могут применяться такие методы регулирования, как оптимизация калибровки, подбор размеров катализатора или введение катализатора⁵³. За пределами РОВА оснащенные системой ИКВ двигатели уровня I проявляют себя на 4 % эффективнее двигателей уровня II; с целью экономии топлива их можно использовать для соблюдения требований по выбросам, соответствующим уровню II⁵⁴.

56. При внедрении ИКВ на морских судах могут возникнуть некоторые специфические ограничения. ИКВ может использоваться с любым судовым топливом, хотя при более низких уровнях SO_2 в отработавших газах и при более высоких температурах каталитическая реакция более эффективна. Кроме того, во избежание образования бисульфата аммония (БСА) или серной кислоты необходимо соблюдать особую осторожность; такая вероятность особенно высока при сжигании топлива с высоким содержанием серы при низких температурах. Вместе с тем для недопущения повреждения катализатора, окисления NH_3 и увеличения выхода SO_3 температура отработавших газов должна быть достаточно низкой. По этой причине крайне важную роль играет оборудование для контроля температуры отработавших газов, которое нередко устанавливается в блоке ИКВ. Размер установки ИКВ зависит от мощности двигателя, расхода газа, используемого восстановителя (например, для аммиачных растворов требуется смеситель меньшего объема, чем для мочевины, но их труднее и опаснее хранить), а также от срока службы катализатора (т. е. катализаторы большего размера имеют более длительный срок службы). Для обеспечения надлежащей эффективности и долговечности ИКВ необходимо периодически проводить техническое обслуживание и контроль работы оборудования, особенно с учетом

⁴⁹ Rasmus Parsmo and others, *NO_x Abatement in the Baltic Sea: An Evaluation of Different Policy Instruments*, No. C 247 (Stockholm, IVL Swedish Environmental Research Institute, 2017).

⁵⁰ Там же.

⁵¹ Winnes and others, “Evaluation, control and Mitigation”.

⁵² Там же.

⁵³ Incentive Partners and Litehauz, *Economic Impact Assessment*.

⁵⁴ Lloyd’s Register, *Understanding Exhaust Gas Treatment Systems*.

возможности попадания пыли или химических соединений, отравляющих катализатор.

57. Для оптимизации эффективности теплообмена технологии ИКВ могут быть легко объединены с такими технологиями удаления РМ, как ДСФ и/или скрубберы, расположенными ниже по потоку от ИКВ.

58. Капитальные вложения для внедрения установок ИКВ варьируются в пределах от 19 до 100 евро на кВт⁵⁵ в зависимости от размера двигателя (меньшие двигатели могут иметь более высокую стоимость на кВт), новизны изготовления или модернизации, а также типа двигателя (двух- или четырехтактный). Расходы на эксплуатацию и техническое обслуживание ИКВ варьируются от 3 до 10 на МВтч, при этом для двухтактных двигателей зафиксированы более высокие средние расходы по сравнению с четырехтактными⁵⁶. Эксплуатационные расходы в основном касаются замены катализатора, потребления мочевины или аммиака и соответствующих затрат на рабочую силу. Наибольший вклад в расходы вносит потребление азотных реагентов; так, например, затраты на мочевину оцениваются в пределах 1–5 евро за МВтч⁵⁷. Наконец, расходы на техническое обслуживание составляют около 1,2 % от инвестиций в годовом исчислении.

Дизельные сажевые фильтры

59. Дизельные сажевые фильтры (ДСФ) состоят из пористой керамической подложки, которая задерживает твердые частицы, присутствующие в отработавших газах, тем самым очищая газы по мере их прохождения через фильтр. В дизельных двигателях с воспламенением от сжатия при использовании ДСФ может быть достигнуто снижение выбросов РМ на 45–92 %, при этом снижение выбросов ЧУ также может достигать до 70–90 %⁵⁸. Кроме того, при использовании дизельного окислительного каталитического нейтрализатора (ДОКН) или каталитического покрытия в фильтрах с проточными стенками можно добиться снижения выбросов СО и ЛОС на 60–90 %. Однако применение ДОКН ограничено при содержании серы в топливе, превышающем 50 частей на миллион. Более того, в процессе использования через некоторое время уловленные частицы начинают накапливаться на фильтре, вследствие чего увеличивается перепад давления, в связи с чем необходимо применять систему горелок или окисления, а это негативно сказывается на выбросах NO_x и СО₂. Наконец, применение ДСФ влечет за собой увеличение расхода топлива на 1–4 %, что, как и в большинстве случаев применения технологий очистки дымовых газов, также ухудшает экологический след судна.

60. Для обеспечения надлежащего функционирования технологии ДСФ следует использовать малосернистое топливо (с содержанием серы менее 0,5 % по весу, что не должно вызывать затруднения с момента вступления в силу ограничений на содержание серы согласно регламенту ИМО 2020), а также контролировать температуру отработавших газов. Необходимость дополнительного пространства для установки ДСФ в силу ее больших размеров может оказаться дополнительным ограничением, в частности это касается установки сажевых горелок для регенерации. И наконец, применение ДСФ на морских судах все еще довольно ограничено по сравнению с автомобильной отраслью; кроме того, последние исследования показали, что были проведены только краткосрочные испытания, и данная технология на морском транспорте все еще находится на экспериментальной стадии применения.

Рукавные фильтры

61. Рукавные фильтры — это высокопроизводительные фильтры, которые широко применяются на наземных предприятиях, а в последнее время получили применение в нескольких пилотных проектах на морском транспорте. Благодаря использованию

⁵⁵ Hulda Winnes and others, NO_x controls for shipping in EU Seas. Transport and Environment, Report No. U5552 (Stockholm, IVL Swedish Environmental Research Institute, 2016).

⁵⁶ Incentive Partners and Litehauz, *Economic Impact Assessment*.

⁵⁷ Rouil and others, “ECAMED”.

⁵⁸ Papadimitriou and others, *Best Available Techniques*.

рукавных фильтров было отмечено значительное сокращение выбросов РМ и ЧУ, превышающее 99 %⁵⁹. В целом, для обеспечения высокой эффективности и долговечности рукавного фильтра отработавшие газы перед поступлением в фильтр должны пройти десульфурацию. Поэтому при введении в рукавный фильтр химически активного агента, например бикарбоната натрия, выбросы SO_x также могут быть резко снижены. Наконец, снижение выбросов NO_x также достижимо за счет использования каталитических пакетов с противопоточным впрыском мочевины, что, однако, может увеличить выбросы NH₃ за счет проскока NH₃.

62. Основными преимуществами данной технологии являются ее совместимость с технологиями серо- и азоточистки для целей соответствия приложениям к Конвенции МАРПОЛ, а также потребление небольшого количества необходимой дополнительной электроэнергии, низкий перепад давления (10–20 миллибар) и минимальная необходимость в техническом обслуживании.

VII. Наилучшие имеющиеся методы в портах

A. Общеприменимые методы сокращения выбросов

63. Внедрение методов сокращения выбросов для судов, стоящих у причала в портовых зонах, доказало свою эффективность; например, благодаря принятой стратегии сокращения выбросов в портах Лос-Анджелеса и Лонг-Бич в период с 2005 по 2013 годы сокращение выбросов РМ, NO_x и SO₂ достигло 81 %, 55 % и 89 % соответственно⁶⁰. Представленные выше наилучшие имеющиеся методы (НИМ) для главных двигателей позволяют добиться снижения выбросов и в портах, однако некоторые из методов очистки отработавших газов (т. е. вторичные меры) при очень низких нагрузках на двигатель могут оказаться неэффективными. Более того, вспомогательные двигатели вносят не меньший и даже больший чем главные двигатели вклад в выбросы стоящих у причала судов; поэтому вспомогательные двигатели также должны быть оснащены системами очистки отработавших газов.

64. К числу других эффективных средств ограничения ухудшения качества воздуха в портовых зонах относятся оптимизация запланированного времени пребывания судов у причала, внедрение автоматизированных систем швартовки и береговых насосов для операций по разгрузке наливных грузов. При погрузке и разгрузке летучих наливных грузов применимы системы улавливания паров, позволяющие сократить неорганизованные выбросы ЛОС до 99 %⁶¹. Кроме того, в портовых зонах важно проанализировать и другие источники выбросов, например циркулирующие по территории транспортные средства, асфальтирование дорог, двигатели для энергоснабжения и погрузочно-разгрузочного оборудования. Улучшению качества воздуха в портовых зонах также способствуют замена машин на более современные модели, отвечающие лучшим экологическим стандартам, или переход на более чистое топливо.

B. Электроснабжение судов от береговой сети или барж

65. Энергоснабжение судов от береговой сети, также известное как «электроснабжение при холодных двигателях», заключается в подаче электроэнергии на находящиеся у причала суда при выключенных главных и вспомогательных двигателях. Следовательно, как и в случае большинства таких методов электрификации, как применение электромобилей, этот метод эффективен при выработке электроэнергии более чистым способом по сравнению со сжиганием топлива в судовых двигателях. Как правило, эффективность достигается за счет того,

⁵⁹ LAB, DeepBlueLAB - Bag particle filters. Personal communication (2020).

⁶⁰ IMO, “Study of emission control and energy efficiency measures for ships in the port area”, MEPC 68/INF.16.

⁶¹ Winnes and others, “NO_x controls for shipping in EU Seas”.

что на крупных предприятиях, производящих сжигание топлива, например на тепловых электростанциях, контроль и регулирование выбросов загрязняющих веществ осуществляются на гораздо более высоком уровне. Кроме того, при выработке электроэнергии на возобновляемых источниках или на ядерной энергии этот метод обеспечивает получение электроэнергии практически с нулевыми выбросами с точки зрения выбросов отработавших газов; однако, как показывает полная ОЖЦ, которая представляет большой интерес для декарбонизации сектора, и в этом случае полностью исключить выбросы не удается.

66. В тех регионах, где производство электроэнергии на электростанциях регулируется на должном уровне, переход на электроснабжение судов от береговых источников позволил добиться снижения выбросов NO_x, SO₂, PM и ЛОС до 95 %⁶². Заслуживает внимания опыт Китая, совершившего переход на использование всеми судами, стоящими у причалов в китайских терминалах, во вспомогательных двигателях средневязкого дизельного топлива (СДТ) с содержанием серы, равным 0,5 весового процента, а также на электроснабжение от береговых источников, когда 65,5 % электроэнергии производится электростанциями, оснащенными техническими средствами борьбы с загрязнением окружающей среды и работающими на обессеренном угле, а остальные потребности в ней удовлетворяются за счет возобновляемых источников энергии или атомной энергетики; благодаря применению указанных методов сокращение выбросов по SO₂ составило 81 %, по NO_x — 97 %, по PM — 77 % и 22 % по CO₂⁶³. С точки зрения достижения углеродной нейтральности внедрение в Европе электроснабжения от береговых источников, по оценкам, позволяет сократить выбросы CO₂ на 39 % в целом, при этом на местном уровне сокращение может достигать до 54–99 % (99 % в Осло; по всей вероятности, это стало возможно по причине крайне низкой углеродоемкости электроэнергии)⁶⁴.

67. Анализ системы электроснабжения от береговых источников позволяет выявить некоторые проблемы, связанные с используемой в сети частотой, системой поддержания напряжения на борту, динамической или статической нагрузкой, заземлением, количеством точек подключения, конфигурацией причала, возможностями модернизации существующих судов, а также стоимостью электроэнергии. Однако следует учитывать, что береговое электроснабжение создает и другие преимущества в виде снижения общего уровня шума в порту и вибрации судов, а также косвенно стимулирует переход на применение электрических или гибридных аккумуляторных батарей. Лучшими кандидатами для внедрения «электроснабжения при холодных двигателях» являются контейнеровозы, рефрижераторные и круизные суда, поскольку они работают на регулярных линиях и во время стоянки у причала нуждаются в значительном количестве электроэнергии.

68. Системы электроснабжения от береговых источников должны включать в себя оборудование для подключения к распределительной электрической сети, подземные помещения для электрооборудования, трансформатор, а также подходящее пространство для электроустановки, кабельные колодцы, кабельное и синхронизирующее оборудование и причальную инфраструктуру. Все эти инфраструктурные сооружения требуют инвестиций, которые, по оценкам ряда исследований, проведенных в портах США и Канады, колеблются в диапазоне от 1 до 15 млн долл. на один причал⁶⁵. Снизить инвестиции позволяет планирование и проектирование перехода на «береговое электроснабжение» до начала строительства порта. С точки зрения судовладельца, затраты на переоснащение судна для обеспечения возможности подключения существующих судов к береговой

⁶² Там же.

⁶³ Cheng Jieling and Li Haibo, “Analysis of Environmental Benefits of Shore Power for Preventing and Controlling Air Pollution Caused by Vessels at Berth”, *E3S Web of Conferences*, vol. 53, art. No. 04036 (2018).

⁶⁴ IMO, “Reduction of GHG emissions from ships. Vessel shore power installation worldwide”, MEPC 73/INF.29/Rev.1.

⁶⁵ Global Environment Facility (GEF)-United Nations Development Programme (UNDP)-IMO GloMEEP Project and International Association of Ports and Harbours (IAPH), *Port Emissions Toolkit, Guide No.2 – Development of Port Emissions Reduction Strategies* (n.p., 2018).

электросети составляют от 0,4 до 2 млн долл. США в зависимости от конструкции судна, и, как ожидается, по мере расширения применения этого метода такие затраты будут снижаться⁶⁶. Кроме того, в настоящее время большинство новых судов уже проектируются для электроснабжения от береговых источников.

69. Система электроснабжения от баржи — еще одна технология, применяемая с целью обеспечения судна электрической энергией с помощью внешнего по отношению к судну двигателя, который соответствует лучшим стандартам выбросов по сравнению с судовыми двигателями. Как правило, в двигателях барж используются СПГ или другие альтернативные виды топлива, например биотопливо. Кроме того, преимущество этого метода заключается в простоте использования и высокой мобильности при переходе от одного дока к другому. Для судов возникают те же ограничения, что и в случае подсоединения к береговым энергосистемам. В зависимости от оборудования энергоблока плавучей базы и условий эксплуатации сокращение выбросов достигается за счет применения разнообразных подходов. В случае работающего на СПГ двигателя цикла Отто можно ожидать снижения выбросов до 80 % по NO_x, 98 % по PM, почти 100 % по SO₂ и 30 % по CO₂. Стоимость этой технологии оценивается примерно в 0,2 млн долл. США, необходимых на модернизацию судна, и около 1000 долл. США в час для оплаты работы энергетической системы баржи.

С. Методы очистки отработавших газов на берегу или на барже

70. Еще одной возможностью снижения выбросов судов в портах является очистка отработавших газов на выходе из трубы судна, которая напрямую соединена с системами очистки отработавших газов на берегу. Кроме того, эти системы требуют электропитания для работы и сами генерируют отработавшие газы, которые могут быть очищены одновременно с отработавшими газами судна. Эти системы обычно состоят из мокрого скруббера в сочетании с ИКВ и направлены на достижение уровней выбросов, аналогичных береговым системам электроснабжения. При применении описанной технологии сокращение выбросов PM и NO_x может достигать 98 % и 95 % соответственно⁶⁷.

71. Основное преимущество этого метода заключается в том, что на судне не требуется никаких модификаций; кроме того, система очистки может работать как на стоящей на якоре барже, так и на причале. Однако в применении этой технологии существуют некоторые ограничения, обусловленные конфигурацией портов и доков, пространством терминала и возможным вмешательством в погрузочно-разгрузочные операции. Этот метод считается еще не до конца отработанным и требует дальнейшей разработки, необходимой для выявления его эффективности при различных нагрузках по отработавшим газам. В настоящее время имеется лишь весьма ограниченная информация о стоимости применения этого метода. В одном случае производитель оценил индивидуальную стоимость этой системы примерно в 8 млн долл. США при создании большого количества таких систем⁶⁸.

VIII. Выводы и рекомендации

72. В вышеприведенных пунктах были проиллюстрированы несколько методов снижения выбросов, производимых судами, как во время плавания, так и у причала, а также рассмотрены ограничения в их применении, их преимущества и недостатки, эффективность снижения выбросов, включая оценку инвестиционных и эксплуатационных затрат. Некоторые из обсуждаемых методов представлены уже

⁶⁶ Thalís Zis, “Prospects of cold ironing as an emissions reduction option”, *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, vol. 119 (January 2019), pp. 82–95.

⁶⁷ G. Tan Weiwei and others, “Application of the DOC-DPF integrated exhaust particle treatment device for new diesel marine engines”, *IOP Conference Series: Earth and Environment Science*, vol. 358, No. 4 (2019).

⁶⁸ GEF-UNDP-IMO GloMEEP Project and IAPH, *Port Emissions Toolkit*.

зрелыми технологиями, в то время как другие требуют дальнейшего развития. С другой стороны, очевидно, что не все методы подходят и применимы ко всем типам и размерам судов.

73. Кроме того, судовладельцы должны покрывать капитальные затраты, поэтому существует необходимость регулирования на международном уровне, в основном в рамках Конвенции МАРПОЛ. Тем не менее по крайней мере в некоторых районах региона Европейской экономической комиссии ООН (например, в субрегионе Европейского союза) уже введены нормы по контролю качества морского топлива, а на местном уровне в некоторых портах реализуются проекты берегового электроснабжения. Огромное значение для улучшения качества воздуха в соответствующих городах имеют меры, принимаемые на местном уровне, особенно в отношении качества и типа топлива, а также портовой инфраструктуры.

74. Инновационные методы находятся в стадии разработки, и они могут способствовать дальнейшему сокращению выбросов, когда перейдут из экспериментальной фазы в фазу повсеместного применения.

75. Экспертам Сторон рекомендуется должным образом учитывать методы, проиллюстрированные в настоящем руководящем документе при разработке национальных планов сокращения выбросов и процессов декарбонизации, а также синергетический эффект от одновременного решения проблем загрязнения воздуха и борьбы с изменением климата.
