

DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-1-130-145

ENVIRONMENTAL SAFETY. LIMITATION OF SULFUR EMISSIONS BY THE SHIP POWER PLANTS

A. P. Petrov, G. E. Zhivljuk

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

It is noted that more than 70 thousand vessels will be affected by the regulation due to the International Maritime Organization restrictions - the content of sulfur in the fuel is not more than 0.5% that will come into force in 2020. In this regard, ship owners assess their capabilities to ensure compliance with the new requirements. The materials of the international organizations and classification societies Det Norske Veritas and Germanischer Lloyd, which reflect the latest regulatory changes and measures to comply with the requirements for emissions of sulfur compounds, as well as technological and market developments on the problem of such emissions reducing, are used in the paper. The current and perspective restrictions on sulfur emissions are considered. It is noted, that the stronger restrictions are already exist in emission control zones in Europe, North and South America, in ports and coastal areas of China, and new control zones are being created. The transition from the local observance of new restrictions to the global is awaited in the time remaining until 2020. The norm change of sulfur content in fuels affects all types of fuel oil and distillates. It is emphasized that the achievement of regulatory indicators for sulfur emissions can be obtained using the appropriate fuel: the special types of low-sulfur fuel, the transition from high-sulfur fuel oil to marine gas oil or distillates. The other way is to apply the engines exhaust gas cleaning methods in special peripheral devices (scrubbers) running on the traditional high-sulfur fuels, which allows working with conventional fuels. The real possibility of pre-equipping ships with engine power supply systems with alternative fuels, such as LNG or others sulfur-free is considered. The features of proposed innovations are analyzed in the paper.

Keywords: ship power plants, internal combustion engine, environmental safety, standards, fuel, exhaust gases, exhaust emissions, sulfur, sulfur oxide, scrubber, wash water.

For citation:

Petrov, Aleksandr P., and Grigorij E. Zhivljuk. "Environmental safety. Limitation of sulfur emissions by the ship power plants." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 11.1 (2019): 130–145. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-1-130-145.

УДК 621.436

ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ. ОГРАНИЧЕНИЕ ВЫБРОСОВ СЕРЫ СУДОВЫМИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИМИ УСТАНОВКАМИ

А. П. Петров, Г. Е. Живлюк

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

Отмечается, что в результате ограничений Международной морской организации по содержанию серы в топливе не более 0,50 %, которые вступят в силу в 2020 г., регулированием будет затронуто более 70 тыс. судов. В связи с этим владельцы судов оценивают свои возможности для обеспечения соответствия новым требованиям. В предлагаемой статье использованы материалы международных организаций и классификационных обществ Det Norske Veritas и Germanischer Lloyd, в которых отражены последние нормативные изменения и меры по соблюдению требований, предъявляемых к выбросам соединений серы, а также технологические и рыночные разработки по проблеме сокращения таких выбросов. Рассмотрены действующие и перспективные ограничения по выбросам серы. Обращается внимание на то, что более строгие ограничения уже существуют в зонах контроля выбросов в Европе, Северной и Южной Америке, в портах и прибрежных районах Китая, создаются новые зоны контроля. В оставшееся до 2020 г. время предстоит перейти от локального соблюдения новых ограничений к глобальному. Изменение нормы по содержанию серы в топливах затрагивают все виды мазутов и дистиллятов. Подчеркивается, что достижение нормативных показателей по выбросу серы может быть получено в результате использова-

ния надлежащего топлива: специальных видов низкосернистого топлива, перехода с высокосернистого мазута на морской газойль или дистилляты. Отмечается, что другой путь состоит в применении методов очистки отработавших газов двигателей в специальных периферийных устройствах (скрубберах), работающих на традиционных высокосернистых сортах топлива, что позволяет использовать обычное топливо. Рассматривается реальная возможность дооборудования судов системами питания двигателей альтернативными видами топлива, такими как СПГ или другими, не содержащими серы. В статье проанализированы особенности предлагаемых инноваций.

Ключевые слова: судовые энергетические установки, двигатель внутреннего сгорания, экологическая безопасность, нормы, топливо, отработавшие газы, выбросы в отработавших газах, сера, оксид серы, скруббер, вода промывочная.

Для цитирования:

Петров А. П. Экологическая безопасность. Ограничение выбросов серы судовыми энергетическими установками / А. П. Петров, Г. Е. Живлюк // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2019. — Т. 11. — № 1. — С. 130–145. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-1-130-145.

Введение (Introduction)

Вопросам экологической безопасности мореплавания в комплексе проблем современного морского транспорта уделяется повышенное внимание. Наибольший ущерб окружающей среде наносится судовой энергетической установкой, в результате работы которой образуются такие вредные компоненты, как несгоревшие углеводороды, твердые частицы, оксиды азота, парниковые газы и, в отдельных случаях, соединения серы. В то время как на образование ряда опасных компонентов, содержащихся в отработавших газах, можно влиять за счет специальной организации процессов в цилиндре двигателя, эмиссия серосодержащих компонентов целиком и полностью определяется содержанием серы в используемом топливе. Как следствие, решение проблем сокращения выбросов SO_x требует специфических решений. Ожидается, что с 2020 г. вступят в силу новые правила по ограничению до 0,5 % содержания серы в используемом на судах топливе. Новые требования будут действовать во всех международных водах и затронут интересы судовладельцев более 70 тыс. судов.

Принципиальным вопросом является то, что достижение нормативных показателей по выбросам SO_x может быть получено в результате использования специальных видов низкосернистого топлива либо путем очистки в специальных периферийных устройствах отработавших газов двигателей на традиционных высокосернистых сортах топлива. Данной проблеме посвящены материалы международных организаций: IMO (International Maritime Organization — Международная морская организация) [1], ICS (Международная палата судоходства — International Chamber of Shipping) [2], ISO (Международная организация по стандартизации — International Standard Organization) [3], классификационного общества *Det Norske Veritas* и *Germanischer Lloyd* (далее — DNV GL) [4], [5], в которых отражены последние нормативные изменения и меры по обеспечению соблюдения требований к выбросам соединений серы, а также технологические и рыночные разработки для альтернативных решений по проблеме сокращения выбросов SO_x . Указанные материалы являются актуализацией более ранней публикации DNV GL «Global Sulfur Cap», изданной в октябре 2016 г., и включают расширенный раздел по скрубберам.

Проведен анализ действующих в настоящее время региональных ограничений выбросов серы в североамериканских районах, прибрежных к США районах Карибского бассейна, морях, омывающих берега стран Европейского Союза и Китая. Рассмотрены варианты применения альтернативных видов топлива, технического и экологического оборудования, обеспечивающих реализацию современных требований экологической безопасности и защиты окружающей среды.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Действующие и перспективные ограничения по выбросам SO_x . Защита окружающей среды от выбросов вредных веществ в результате промышленной деятельности подробно исследова-

на в работе И. В. Семеновой [6], где кроме вопросов защиты окружающей среды и анализа природных систем рассмотрены природа техногенных газовых выбросов и методы очистки газовых выбросов от соединений серы, а также дана оценка процессов переработки нефти нефтеперерабатывающей и нефтехимической отраслями. В работах [7]–[9] авторами выполнено исследование проблем экологической безопасности судоходства.

С учетом того, что судовые энергетические установки являются основными потребителями высокосернистых тяжелых топлив — High-Sulphur Fuel Oil (HSFO), для регулирования выбросов SO_x IMO в 2015 г. были введены зоны контроля — Sulphur Emission Control Areas (SECA). Расположение SECA показано на рис. 1 [4], [10].

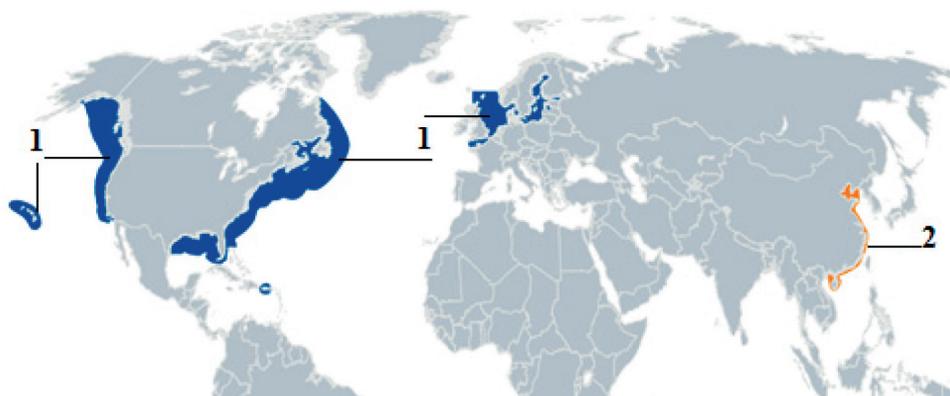


Рис. 1. Расположение SECA и их нормирование:
1 — 0,1 %; 2 — 0,5 %

После обзора допустимости применения совместимого малосернистого мазута, IMO было принято решение о том, что глобальное ограничение содержания серы в топливе 0,5 % для всех районов плавания вступит в силу в 2020 г. Это требование вводится в дополнение к ограничениям в 0,1 % серы в североамериканских и американских районах Карибского бассейна, Северного и Балтийского морей. При этом судам, на энергетических установках которых установлены системы очистки отработавших газов от соединений серы, будет разрешено не прекращать использование HSFO (табл. 1) [4].

Таблица 1

Региональные и глобальные регуляторы серы

Регион	Предел по содержанию серы в топливе	Возможность использования скрубберов
Все районы плавания в международных водах	0,5 % (2020 г.)	Да
Зоны контроля (SECA)	0,1 %	Да
Евросоюз	0,1 % во всех портовых акваториях	В некоторых странах ограничено использование открытого цикла
Китай	0,5 % в национальных водах в 12-мильной зоне	Да
Калифорния	0,1 %, в 24-мильной зоне побережья	Нет, только как исключение в случае отдельной заявки и дополнительных исследований

Существенной поправкой к регулированию является «Соглашение о запрете перевозки HSFO в топливной системе», за исключением судов, оборудованных скрубберами. По-прежнему разрешено перевозить HSFO в качестве груза, однако запрещается иметь HSFO в резервуарах топливных систем в случае, если не используются скрубберы. Эта поправка позволяет задерживать

суда, использующие несоответствующее топливо, при проведении государственного контроля порта — Port State Control (PSC), без необходимости проверки независимо от того, было ли оно использовано или нет. Ожидается, что такие поправки позволят значительно снизить вероятность нарушения требований экологического законодательства в международных водах.

Как видно из табл. 1, директива Европейского Союза (ЕС) предусматривает содержание серы в топливе не более 0,10 % для судов в портах ЕС. В некоторых странах ЕС в рамках директивы ограничивается сброс скрубберной воды. Так, страны Бельгия и Германия запретили сброс воды из скрубберов во многих районах, что послужило ограничением для работы скрубберов с открытым циклом. Невзирая на то, что до настоящего времени в ЕС не существует общепринятой концепции, другие страны ЕС могут последовать этому примеру.

В настоящее время в Гонконге действует ограничение на содержание серы в 0,5 % для судов у причала. В конце 2015 г. Китай опубликовал правила для внутренних требований SECA в морских районах за пределами Гонконга, Гуанчжоу, Шанхая и в Бохайском море. Китай предпринял поэтапный подход, изначально ограничивая максимальное содержание серы в 0,5 % в топливе, сжигаемом в основных портах в этих районах. Недавно власти объявили, что с 1 января 2019 г. планируется расширить географический охват зоной контроля территории в 12 морских миль вдоль всей береговой линии (см. рис. 1, поз. 2). Существует также вероятность того, что после 2019 г. требование по содержанию серы будет ужесточено с 0,50 до 0,10 %, о чем может быть подана официальная заявка в ИМО.

Наиболее строгие требования были выдвинуты Калифорнийским советом по воздушным ресурсам (Air Resources Board — ARB) и введено ограничение на использование топлива с содержанием серы в 0,1 % в пределах 24 морских миль от побережья Калифорнии. Регулирование не допускает каких-либо других вариантов соответствия, кроме использования малосернистых топлив (DMA или DMB). Использование скрубберов допускается в качестве временного исключения, при этом заявка на движение должна быть отправлена до входа в воды Калифорнии. После официального пересмотра постановления законодатели Калифорнии решили сохранить его в качестве дополнения к общим требованиям SECA.

В целом существует общая глобальная тенденция к ужесточению местных правил по предотвращению загрязнения воздуха. В дополнение к рассмотренным зонам контроля, ужесточение норм выбросов SO_x происходит в таких зонах, как Панамский канал, Тайбэй (Тайвань) и иных местных муниципалитетах по всему миру.

Правоприменение технических регламентов. Источником загрязнения окружающей среды соединениями серы являются судовые энергетические установки. Причина выбросов серы состоит в присутствии серы в используемых механическими установками топливах [7]–[9], [11]. ИМО работает над руководствами и циркулярами, направленными на облегчение перехода к новым требованиям для судовладельцев и для поощрения единообразной практики PSC во всем мире. Ожидается, что они будут опубликованы в течение 2019 г.

Одним из разрабатываемых руководящих принципов является «Руководство ИМО по плану внедрения судна с пределом содержания серы 0,5 %», согласно прил. IV к МАРПОЛ [12] (Ship Implementation Plan, далее — План), предназначенное для более легкой адаптации управляющих компаний к новым требованиям по соблюдению предельного уровня серы в 0,5 % в 2020 г. Документ не является обязательным и не подлежит одобрению государством флага или признанной организацией — Recognized Organization (классификационное общество). Тем не менее PSC может принимать во внимание предписанные подготовительные действия при проверке соответствия. В План включены прилагаемые рекомендации по воздействию на механические установки и процедуры очистки резервуаров, а также рассмотрены вопросы использования совместимого мазута и выявления любых рисков безопасности, связанных с использованием таких видов топлива. В случае отсутствия возможности использования судном топлива, соответствующего требованиям, ИМО предлагает отчет о недоступности использования мазута — Fuel Oil Non-Availability Report (FONAR), в котором должны быть указаны запланированные посещения портов

и другая необходимая информация. При этом суда не обязаны отклоняться от запланированного маршрута, и имеющееся на борту топливо может быть использовано до следующего порта, где должно быть приобретено топливо соответствующего качества.

Несмотря на то, что государства флага несут ответственность за соблюдение требований по предотвращению загрязнений серой международных вод, ожидается, что правоприменение исполнения останется, в первую очередь, вопросом PSC. Для того чтобы препятствовать нарушениям правил в международных водах, ИМО поддерживает общий запрет на перевозку HSFO в топливных системах, за исключением судов, оборудованных скрубберами. Это позволит PSC задерживать суда, перевозящие несоответствующее топливо, без необходимости доказательства того, что оно фактически использовалось во внутренних или международных водах.

В качестве предварительной проверки соответствия судов регламенту предполагается мониторинг выбросов SO_x посредством дистанционных датчиков [4], [13]–[16]. Такие датчики, или так называемые *снифферы*, установленные на самолетах или закрепленные на мостах или входах в гавань, могут указывать, на основании анализа выхлопного шлейфа при прохождении судна, на использование соответствующего топлива. Эти действия направлены на то, чтобы идентифицировать суда, которые должны быть подвергнуты дальнейшей инспекции PSC. Необходимо отметить, что такой мониторинг не способен заменить бортовой отбор проб топлива, так как службы PSC юридически обязаны полагаться только на анализ физических образцов топлива¹. Во время бортовой инспекции PSC должен заниматься поиском доказательств соответствия мазута, доставленного или используемого на борту судна, в бункерной накладной и в книге, фиксирующей запас нефтепродуктов, а также доказательства письменного порядка и записей о любом изменении вида топлива.

Одновременно ИМО разрабатывает требование по назначению точки отбора проб используемого топлива — а Requirement for a Designated Sampling Point for in-use Fuel. Цель разработки документа состоит в том, чтобы дать возможность компетентным органам (например, PSC) принимать репрезентативные образцы используемого топлива. Вероятно, с 2021 г. на этапах первичного контроля при возобновления сертификации к существующим судам будут применяться требования IAPP (International Air Pollution Prevention — Международное обследование по предотвращению загрязнения воздуха). При этом суда, оборудованные топливными системами с низкой температурой вспышки, будут освобождены от этой процедуры.

В настоящее время не сформированы общие требования к единым штрафным санкциям за несоблюдение норм по выбросам SO_x , поэтому санкции определяются индивидуально каждым PSC. Несмотря на то, что штрафы за нарушения требований будут существенно различаться между государствами порта, можно ожидать, что указанный запрет на перевозку HSFO станет весомым фактором для соблюдения новых экологических требований. Возможно также, что, кроме штрафных санкций, суда будут обязаны выгружать несоответствующее требованиям топливо. Таким образом, правоприменение пока будет оставаться неравномерным во всем мире, поскольку ресурсы служб PSC, их возможности и исторический опыт правоприменения значительно различаются.

Выбор стратегии соответствия техническим регламентам. Учитывая, что время на подготовку и реализацию мероприятий, обеспечивающих переход к новым экологическим требованиям, ограничено, судовладельцы должны выбрать свою стратегию соответствия, проанализировать и выбрать возможные варианты. Универсальных решений проблемы не существует, и наилучший вариант, в значительной степени, зависит от типа судна, его размера, эксплуатационных характеристик и того, какие виды топлива [17] доступны в короткие и длительные сроки. Для вариантов, требующих модификации, важно учитывать сложность установки, интенсивность и эффективность эксплуатации, а также оставшийся срок эксплуатации судна. Усложняющим фактором при рассмотрении вариантов соответствия являются региональные и местные правила, которые

¹ ГОСТ Р ИСО 7935–2007. Выбросы стационарных источников. Определение массовой концентрации диоксида серы. Характеристики автоматических методов измерений в условиях применения. М.: Стандартинформ, 2007. 12 с.

в некоторых случаях предусматривают более строгие требования, а в других — запрет некоторых вариантов соответствия [18]. Далее рассмотрены доступные варианты достижения соответствия новым требованиям по контролю и ограничению выбросов серосодержащих продуктов.

Использование морского газойля или дистиллятов. Переход на дистиллятное или MGO (Marine Gas Oil) топливо будет означать значительное увеличение затрат по статье горюче-смазочных материалов, а также может потребовать модернизацию энергетической установки в части топливоподготовки из-за значительно более низкой вязкости топлива. Топливные танки, ранее используемые для HSFO, должны быть тщательно очищены до бункеровки MGO во избежание проблем загрязнения и, как следствие, нарушения требований.

Основная проблема использования MGO или дистиллятов связана с их доступностью и стоимостью на рынке топлива. Многие аналитики считают [4], [9], что в первые несколько месяцев после внедрения новых требований разница цен между HSFO и дистиллятами будет очень высокой, что значительно увеличит стоимость топлива и сделает альтернативные варианты финансово привлекательными. Недостатки и преимущества использования дистиллятов приведены в табл. 2.

Таблица 2

Ожидаемые результаты использования морского газойля или дистиллятов

Дистиллятные топлива	
Преимущества	Недостатки
Используется для большинства конфигураций двигателей	Более высокая стоимость топлива. Может создать рабочие проблемы из-за низкой вязкости топлива

Новые совместимые низкосернистые топлива. Ожидается, что топливные смеси с низким содержанием серы будут доступны на рынке в виде различных продуктов. Однако установки для десульфурации являются очень дорогостоящими, а их монтаж, внедрение и наладка могут занять несколько лет до того, как они начнут функционировать с полной производительностью [19]. Таким образом, большинство нефтеперерабатывающих заводов предпочитают перерабатывать более высокосортные виды топлива, а не инвестировать в системы десульфурации. Можно полагать, что для удовлетворения спроса произведут новые топливные смеси, которые будут соответствовать требуемому пределу содержания серы менее 0,5 %, при снижении стоимости на 10–15 % по сравнению с прямыми дистиллятными видами топлива. Первые образцы топлива были представлены в конце 2018 г. Весьма вероятно, что при использовании новых топливных смесей возникнут проблемы совместимости и это сделает технологическую подготовку топлива очень важным процессом для безопасной эксплуатации агрегатов энергетической установки. Другие проблемы, связанные с рассматриваемым видом топлива, включают долговременную стабильность, воздействие на катализаторы и относительно низкую температуру вспышки.

Большое значение приобретает контроль качества при бункеровке, необходимый для того, чтобы обеспечить получение топлива в соответствии со спецификацией. Однако действующий стандарт топлива ISO 8217¹ [3], не охватывает все аспекты безопасности, связанные с новыми топливными смесями. Шестое издание этого стандарта, опубликованное в марте 2017 г., не предназначено и не может решить все вопросы, возникающие в связи с внедрением на рынок менее традиционных видов судового топлива с максимальной 0,1 % серой для эксплуатации в районах ECA. Технический комитет, занимающийся рассмотрением и обновлением стандарта ISO 8217 на морское топливо, а также ISO 8216 («Классификация морского топлива»), приступил к рассмотрению вопроса о следующем пересмотре в расчете на ограничение предельного содержания серы 0,5 % в 2020 г. Процесс пересмотра занимает не менее трех лет, поэтому он будет готов не ранее, чем в конце 2020 г.

¹ ГОСТ Р 54299-2010 (ИСО 8217:2010). Топлива судовые. Технические условия. М.: Стандартинформ, 2012. 31 с.

В ответ на запрос ИМО об обеспечении согласованности между действующими стандартами ISO по морским топливам [3] и внедрением предела содержания серы в топливе до 0,5 % Технический комитет ISO 8217 (ISO TC28/SC4/WG6) в 2019 г. планирует опубликовать общедоступную спецификацию PAS (Publicly Available Specification), озаглавленную как «Соображения относительно поставщиков топлива и пользователей в отношении качества морского топлива с учетом максимального содержания серы до 0,5 % в 2020 г.» [4]. PAS содержит инструкции (как для поставщиков топлива, так и для судовладельцев) обеспечения плавного перехода к требованиям 2020 г. Она будет промежуточной спецификацией, опубликованной до утверждения полного международного стандарта. Первоначальный срок действия PAS до трех лет, после чего она может быть продлена еще на три года или отозвана. PAS или ее элементы могут быть приняты в рамках следующего полного пересмотра ИСО 8217.

В настоящее время ISO 8217 разделен на сорта MD (Distillate Marine Fuel — судовое дистиллятное топливо), DF (Distillate FAME — Fatty Acid Methyl Esters — дистиллятное топливо на основе метиловых эфиров жирных кислот) и RM (Residual Marine — топливо для судовых установок). Имеются некоторые виды топлива, удовлетворяющие предельному уровню содержания серы 0,1 %, которые не входят в категорию дистиллятов и, следовательно, обычно продаются по остаточным морским спецификациям ISO 8217 (марки RM).

Наиболее насущные проблемы, связанные с качеством смесей с предельным содержанием серы 0,5 %, в 2020 г. будут связаны со стабильностью и совместимостью различных продуктов, и это, вероятно, будет в центре внимания. Следует разработать новые методы испытаний для получения более точной оценки стабильности и совместимости топлива. Особенности и результаты использования совместимых низкосернистых топлив приведены в табл. 3 [4].

Таблица 3

Преимущества и недостатки новых низкосернистых топлив

Новые совместимые низкосернистые топлива	
Преимущества	Недостатки
Используется для большинства конфигураций двигателей	Неизвестная стоимость топлива. Неопределенная доступность. Может создавать операционные проблемы из-за различия физико-химических характеристик или несовместимости

HSFO со скруббером SO_x. Применение HSFO по-прежнему будет возможным и после 2020 г. Однако для соответствия нормам потребуются внедрение в конструкцию газовыпускных трактов энергетической установки устройств с технологией очистки отработавших газов, широко известных как скрубберы SO_x (см., например [7]). Установка скрубберов не требует никаких изменений в конструкции двигателей энергетической установки или систем топливоподготовки и топливоподачи. Однако в целом такая модернизация силовой энергетической установки может оказаться достаточно сложной и дорогостоящей, поскольку существует значительная инвестиционная стоимость установки оборудования, которая будет суммироваться с эксплуатационными расходами, связанными с увеличением потребления энергии, возможной потребностью в химических расходных материалах, а также с затратами на обработку осадка.

Один из ключевых вопросов заключается в том, смогут ли производители скрубберов и другие поставщики связанного с этими системами оборудования обеспечить возможность производства и монтажа достаточного количества таких систем на судах до 2020 г. В долгосрочной перспективе, если разница в цене между высоко- и низкосернистым топливом окажется достаточно высокой, а опыт эксплуатации и технического обслуживания докажет целесообразность использования этих систем, то скрубберы могут стать широко распространенной технологией.

Основные преимущества и недостатки технологии представлены в табл. 4, более подробная информация о технологиях скрубберов SO_x приведена далее.

Таблица 4

Технология скрубберов SO_x

HSFO со скруббером	
Преимущества	Недостатки
Может использовать обычный HSFO. Возможно переоснащение. Уменьшает содержание твердых частиц, а также SO _x . Привлекательный бизнес-проект для определенных типов судов.	Значительные первоначальные инвестиции (2–10 млн долл.). 3–5 % штрафа за топливо. Требуется место для установки скрубберной башни и опорных систем. Возможны дополнительные затраты на химикаты. Необходима интеграция в систему управления. Требуется мониторинг.

Сжиженный природный газ (Liquefied Natural Gas — LNG) в качестве топлива. Совершенно очевидным является тот факт, что использование LNG в качестве основного топлива получит новые преимущества в свете новых ограничений IMO по выбросам серы. LNG в качестве судового топлива является технически обоснованным решением, а бункеровочная инфраструктура быстро развивается по всему миру. Традиционные нефтяные топлива будут оставаться основным видом топлива для большинства существующих судов в ближайшем будущем, однако коммерческие возможности LNG перспективны главным образом для новых проектов судов, но в некоторых случаях также интересны и для проектов конверсии и модернизации. При этом перевод энергетической установки на LNG следует производить только на основе тщательного анализа разносторонней информации. И хотя подробный анализ достоинств использования газообразного топлива не является предметом рассмотрения настоящей публикации, необходимо акцентировать внимание на отдельных аспектах данной проблемы. Помимо коммерческих аспектов, основным аргументом в пользу выбора LNG в качестве замены обычных нефтяных топлив является существенное сокращение общего загрязнения воздуха от выбросов не только SO_x, но и NO_x, а также выбросов твердых частиц (Particulate Matter — PM). Полное устранение выбросов SO_x и PM — потенциальная возможность сокращения выбросов NO_x до 85 % — способствует использованию LNG особенно в зонах контроля. Кроме того, LNG может снизить выбросы парниковых газов на 10–20 % в зависимости от технологии двигателя. Таким образом, использование LNG выявляет множество преимуществ как для здоровья человека, так и для сохранения окружающей среды. Кроме того, оно также оказывает положительное влияние на коэффициент энергоэффективности судна (Energy Efficiency Design Index — EEDI) [20].

Сегодня двигатели, способные использовать газообразное топливо, охватывают широкий диапазон мощности. Таким образом, газовые двигатели, а также двухтопливные четырехтактные и двухтактные двигатели (газодизели) подходят практически для всех типов судов. Преимущества и недостатки использования LNG приведены в табл. 5.

Таблица 5

Преимущества и недостатки использования LNG

LNG в качестве топлива	
Преимущества	Недостатки
Имеет хорошие экологические показатели. Может достигать требований уровня NO _x Tier III. Положительное влияние на EEDI.	Высокие инвестиционные затраты (3–30 млн долл.). Дорогостоящее дооснащение / модернизация. Большие региональные различия по ценам LNG. Возможность появления в отработавших газах метана. Требуется место и условия для хранения. Некоторым типам двигателей необходимы дополнительные средства для достижения уровня NO _x Tier III. Взрывоопасен.

Другие альтернативные виды топлива. Существует множество новых видов топлива, которые также могут рассматриваться в качестве вариантов соответствия требованиям по глобальному ограничению выбросов серы. Наиболее распространенными являются метанол, различные виды биотоплива и сжиженный газ — пропан-бутановые смеси — Liquefied Petroleum Gas (LPG)). Считается, что указанные виды топлив очень мало влияют на мировой рынок, но они могут рассматриваться как альтернативные варианты в случаях, когда их поставки легко осуществимы. В настоящее время существует несколько судов, работающих на метаноле в качестве основного топлива, и, как минимум, два газозова сжиженного газа, которые используют LPG в качестве топлива. И тем не менее для перехода на эти виды топлива (помимо некоторых видов биотоплива) потребуется адаптация двигателей, а также создание специфичных топливных систем и систем управления.

Для небольших судов с малой дальностью плавания технически осуществимым решением являются двигатели или топливные элементы, работающие на водороде, а также можно рассматривать электроаккумуляторные системы. Такие энергетические установки уже находятся в эксплуатации и обеспечивают преимущества операций с нулевым уровнем выбросов. К примеру, в эксплуатации уже находятся паромы с батарейным питанием, а паровые паромы с водородным двигателем планируется построить в ближайшие два-три года в Норвегии, Шотландии и Калифорнии.

Различные варианты конструктивного исполнения систем очистки отработавших газов. Использование технологии скрубберов в составе судовых энергетических установок получило распространение с момента внедрения зон SECA в Европе и в Северной Америке в 2015 г. [4]. Удаление выбросов SO_x из отработавших газов до или ниже предельных значений выбросов, предусмотренных в МЕРС.259 (68), считается полным эквивалентом требований, указанных в регламенте 4 прил. VI к MARPOL [12]. Применение скрубберов приводит к существенному увеличению рабочей нагрузки экипажа, требуя усилий по эксплуатации и техническому обслуживанию и являясь в то же время весомой альтернативой для использования малосернистых топлив. При этом следует отметить, что решения по установке скруббера в основном обусловлены привлекательными сроками окупаемости.

Скрубберы нейтрализуют серу в отработавших газах абсорбентом, в качестве которого могут использоваться различные поглотители [7]. Исходя из этого технологии нейтрализации обычно классифицируются как «мокрые» или «сухие» системы. «Мокрые» системы, использующие морскую воду в качестве поглотителя, известные как скрубберы с открытым циклом (Open-Loop), на сегодняшний день являются наиболее используемой и востребованной конструкцией. Большинство поставщиков также предлагают замкнутые и гибридные системы с использованием каустической соды или гидроксида магния в качестве абсорбента (табл. 6). «Сухие» системы используют реагенты в сухой форме, например, известь. «Сухие» системы могут состоять из неподвижного или псевдооживленного слоя, способствующего установлению более полного контакта между газообразной и твердой фазами. В такой конструкции, возможно, потребуется дополнительная установка фильтров для удаления твердых частиц из обработанных в скруббере газов.

Таблица 6

Реагенты скрубберов с замкнутым циклом

Мокрый / влажный адсорбер	Сухой адсорбер
Морская вода	Известь
Каустическая сода	—
Гидроксид магния	—

Скрубберы должны соответствовать требованиям ограничения выбросов вредных веществ как в атмосферу, так и со скрубберной водой, участвующей в очистке отработавших газов. Руководства ИМО для систем очистки выхлопных газов МЕРС.259 (68) [12] предлагают две возможности для сертификации систем:

– схема А предлагает возможность одобрить отдельные системы, серии аналогичных систем или ассортимент продукции (аналогичные конструкции с различной емкостью) и продемонстрировать соответствие посредством непрерывного мониторинга эксплуатационных параметров и выборочных проверок выбросов;

– для схемы В соответствие соблюдается с помощью непрерывных измерений выбросы и проверки параметров.

Способы сертификации по схеме А требуют обширных полномасштабных испытаний выбросов в условиях длительной эксплуатации. Большинство систем, установленных до сих пор, следуют схеме В, требуя непрерывных измерений выбросов SO₂, CO₂ и качества воды для очистки (рис. 2). Мониторинг качества воды для очистки включает непрерывные измерения pH, полициклических ароматических углеводородов (Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (ПАН)) и мутности (единицы измерения мутности IFNU — Formazine Nephelometric Unit или INTU — Nephelometric Turbidity Unit).

Качество используемого топлива при контроле выбросов SO₂ в атмосферу оценивается значениями отношения SO₂ в отработавших газах, выраженного в ppm (Parts Per Million), к выбросу CO₂ в объемных процентах, как это показано на рис. 2. Контрольные значения указанного соотношения могут служить критериями качества очистки отработавших газов в скруббере при использовании HSFO. Анализ и требования к выбросам в забортную воду обеспечиваются на основе разницы измерений показателей pH забортной воды и воды на выходе из скруббера в четырехметровой зоне вокруг сливной трубы. Аналогичным образом выполняется контроль мутности воды и содержания полициклических ароматических углеводородов, при этом изменение ПАН не должно превышать 50 мг/л, а мутность воды не должна увеличиваться более чем на 25 FNU или NTU (1 FNU = 1 NTU). Кроме того, промывочная вода скруббера должна быть проанализирована на содержание нитратов при вводе в эксплуатацию и каждом повторном обследовании.

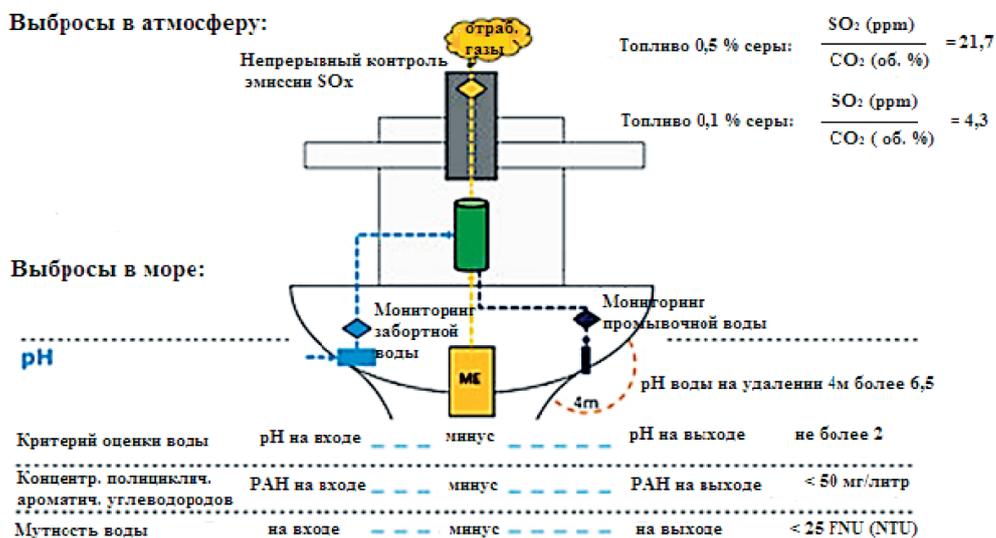


Рис. 2. Общая структура мониторинга

В целях формирования более полного представления о технических возможностях концепции технологии очистки отработавших газов от соединений серы рассмотрим возможные варианты конструкций таких систем и устройств.

Системы с открытым контуром (циклом). Данные системы являются наиболее простыми по конструкции и дешевыми в части монтажа и эксплуатации. Для нейтрализации серы в отработавших газах системы используют естественную щелочность морской воды. Эти системы могут удовлетворять требованиям потребления топлива с содержанием серы от 0,5 до 0,1 % и использоваться во всех областях с достаточной щелочностью морской воды, за исключением

случаев, когда существуют ограничения на сброс скрубберной воды [7]. Концепция скруббера с открытым контуром показана на рис. 3. В открытой системе большие объемы морской воды закачиваются в скрубберную башню, которая предназначена для обеспечения достаточного времени удержания отработавших газов. Распылительные сопла распыляют забортную морскую воду для максимальной нейтрализации кислых газов в объеме скруббера. Вода после очистки отработавших газов сливается со дна скрубберной башни и выводится за пределы корпуса судна через сливные трубы.

Некоторые системы с открытым контуром могут включать в конструкцию оборудование для очистки воды, прошедшей через скруббер. Достоинства и недостатки конструкции скруббера с открытым циклом представлены в табл. 7.

Таблица 7

Преимущества и недостатки скруббера с открытым циклом

Скруббер с открытым контуром	
Преимущества	Недостатки
Простота конструкции (более низкая стоимость). Использует морскую воду непосредственно из моря, не требуется никаких опасных химикатов.	Не допускается в некоторых портах и зонах. Не подходит для солоноватой и пресной воды. Для соответствия требованиям воды по pH в США требуется «разбавляющий» насос.

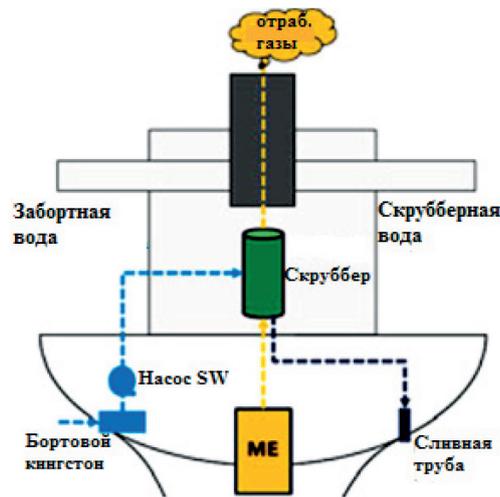


Рис. 3. Скруббер с открытым контуром

Замкнутые / гибридные системы. Система с замкнутым контуром, схема которой показана на рис. 4, обеспечивает возможность работы скруббера в зонах с ограничениями на выпуск промывочной воды или с низкой щелочностью морской водой. В замкнутой системе технологическая вода циркулирует из бака технологической воды через башню и обратно в резервуар. Технологическую воду охлаждают в теплообменнике для уменьшения испарения. Техническая вода судна добавляется в технологическую воду для компенсации испарения промывочной воды, в то время как щелочь добавляется для поддержания щелочности. Некоторая часть технологической воды сливается и обрабатывается с помощью центрифуг или химикатов. Обработанная технологическая вода переносится в накопительный резервуар и выгружается, когда это разрешено, а осадок переносится в резервуар для осадка.

Некоторые системы могут работать как по открытому, так и по замкнутому циклу и называются *гибридными скрубберами*, что обеспечивает повышенную гибкость при работе во всех областях независимо от щелочности морской воды или правил, ограничивающих использование скрубберов с открытым циклом.

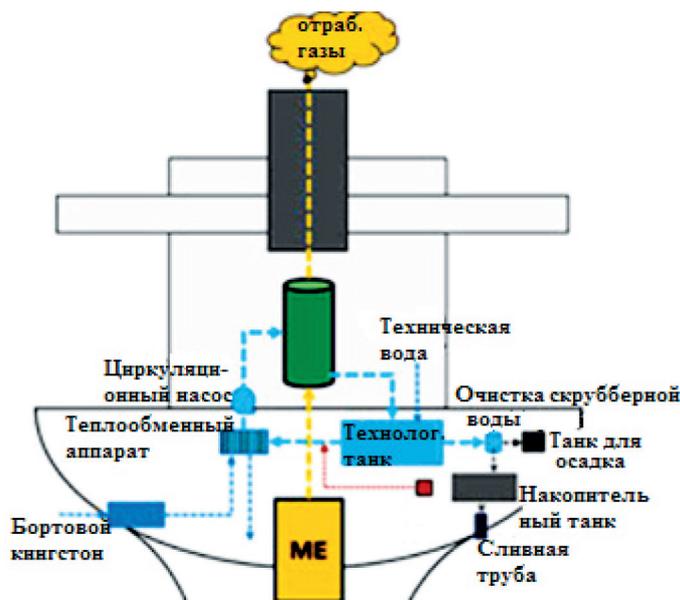


Рис. 4. Скруббер с замкнутым контуром

Описание преимуществ и недостатков гибридных и скрубберов с замкнутым циклом приведено в табл. 8.

Таблица 8

Недостатки и преимущества гибридных и скрубберов с замкнутым циклом

Скруббер с замкнутым контуром	
Преимущества	Недостатки
Повышенная гибкость в эксплуатации. Может работать во всех областях, независимо от щелочности или температуры морской воды.	Повышенная сложность конструкции (более высокие затраты). Требуется постоянная подача щелочной среды (NaOH является опасным и требует специальной обработки).

Типы одноканальных и многоканальных скрубберов. Помимо рассмотренных конструктивных особенностей систем очистки отработавших газов от оксидов серы, можно выделить еще одну компоновочную особенность, которая разделяет скрубберы на одно- и многоканальные. В том случае, если скруббер производит очистку отработавших газов от одного двигателя и имеет только один вход, он является одноканальным (рис. 5).

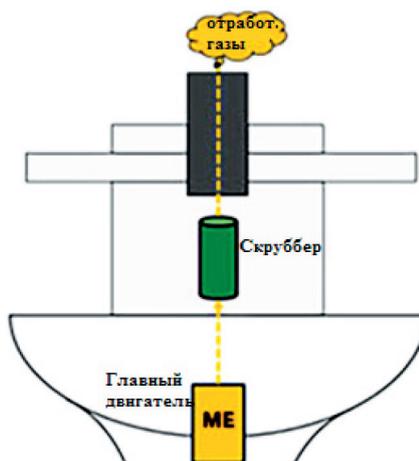


Рис. 5. Одноканальная система скруббера

В тех случаях, когда одним скруббером производится обработка газов от нескольких двигателей, включенных в состав судовой энергетической установки, скруббер должен иметь несколько входов и он считается многоканальным (рис. 6).

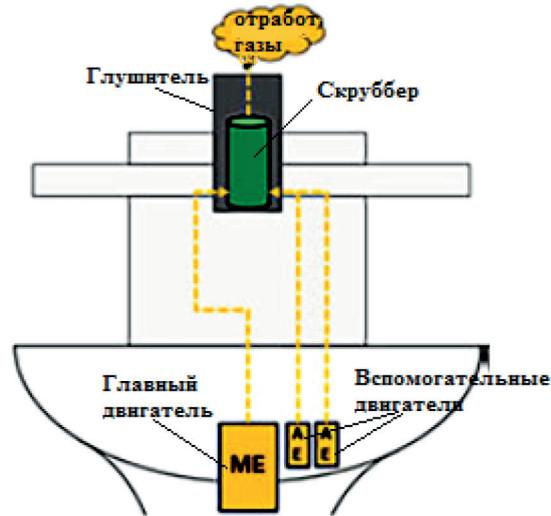


Рис. 6. Система скруббера с несколькими входами

В табл. 9 показаны преимущества и недостатки такой схемы компоновки.

Таблица 9

Одноканальный скруббер

Одноканальная система скруббера	
Преимущества	Недостатки
<p>Малая занимаемая площадь, если башня может заменить глушитель. Низкий центр тяжести, уменьшающий воздействие на устойчивость. Более низкое потребление энергии. Предназначен для поддержания сухого хода (не допускается в некоторых портах и зонах).</p>	<p>Возможна более сложная установка башни. Требует дополнительных башен для покрытия большего количества двигателей.</p>

Вне зависимости от количества входов, конструктивно скруббер может быть совмещен с глушителем, как это показано на рис. 6. Преимущества и недостатки многоканальных скрубберов сведены в табл. 10.

Таблица 10

Многоканальные скрубберы

Скрубберы с несколькими входами	
Преимущества	Недостатки
<p>Может обрабатывать несколько потоков отработавших газов в одной скрубберной башне. Возможна более простая установка. Обычно более экономичное решение для всех двигателей, объединенных в энергетическую установку.</p>	<p>Возможно, более сложная маршрутизация трубопроводов. Требует обходных решений.</p>

Необходимо отметить, что в настоящее время существует достаточно большое количество способов и мер по решению проблемы выбросы оксидов серы. Это обстоятельство ставит судов-

ладельцев перед непростым выбором средств по достижению соответствия с 2020 г. новым требованием ИМО по ограничению содержания серы в используемом топливе. Выбор способа соответствия новым требованиям ИМО представляется сложной организационно-технической проблемой, требующей всестороннего анализа достаточно большого числа факторов влияния.

Выводы (Conclusions)

1. Новые требования ИМО вступают в силу с 2020 г. и будут действовать во всех международных водах, затрагивая интересы судовладельцев более 70 тыс. судов.

2. Требование по ограничению содержания серы в используемом топливе до 0,5 % в международных водах вводится в дополнение к действующим ограничениям в 0,1 % в североамериканских и американских районах Карибского бассейна, Северного и Балтийского морей и других районах SEKA.

3. Сокращение выбросов SO_x требует специфических решений, главными из которых являются:

– переход с высокосернистого мазута (HSFO) на морской газойль (MGO) или дистилляты;

– использование топлива с очень низким содержанием серы или совместимых топливных смесей (0,5 % серы);

– дооборудование судов для использования альтернативных видов топлива, таких как СПГ или другие виды, не содержащие серы;

– установка систем очистки отработавших газов (скрубберов), что позволяет работать с обычным HSFO.

4. Выбор технологии сокращения выбросов серосодержащих продуктов на основе имеющихся альтернативных вариантов должен производиться на основе всестороннего анализа следующих факторов влияния:

– тип и размер судна, его эксплуатационные характеристики;

– доступные виды топлива в разные сроки, а также сложность энергетической установки;

– интенсивность и эффективность эксплуатации и оставшийся срок службы судна и др.

Подробное рассмотрение этих вопросов выходит за рамки данной публикации, но представляет известный интерес и может являться предметом отдельного исследования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Sulphur 2020 — cutting sulphur oxide emissions [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://www.imo.org/en/mediacentre/hottopics/pages/sulphur-2020.aspx> (дата обращения: 15.09.2018).

2. Guidance to Shipping Companies and Crews on Preparing for Compliance with the 2020 'Global Sulphur Cap' for Ships' Fuel Oil in Accordance with MARPOL Annex VI. — London: Marisec Publications, 2019. — 36 p.

3. ISO statement on ISO 8217 and IMO 2020 0,50 % Sulphur fuels [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://shipandbunker.com/news/world/482202-iso-statement-on-iso-8217-and-imo-2020-0,50-sulphur-fuels> (дата обращения: 01.12.2018).

4. Global Sulphur Cap 2020 — extended and updated [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://www.dnvgl.com/maritime/publications/global-sulphur-cap-2020.html> (дата обращения: 22.10.2018).

5. What you need to know: The 2020 IMO fuel sulphur regulation [Электронный ресурс]. — Режим доступа: http://www.seatrade-maritime.com/images/PDFs/SOMWME-whitepaper_Sulphur-p2.pdf (дата обращения: 16.09.2018).

6. Семенова И. В. Промышленная экология: учеб. пособие для студ. вузов / И. В. Семенова. — М.: Академия, 2009. — 528 с.

7. Латухов С. В. Проблемы экологической безопасности судоходства: монография / С. В. Латухов [и др.]. — СПб.: Изд-во ГУМРФ им. адм. С. О. Макарова, 2015. — 160 с.

8. Семанов Г. Н. Вредные выбросы в атмосферу от судов: на пути к стандартам ИМО / Г. Н. Семанов // Наука и транспорт. Морской и речной транспорт. — 2013. — № 1 (5). — С. 45–47.

9. Тимофеев О. Я. Особенности внедрения новых требований к экологической безопасности судов и морских установок в северных морях и на арктическом шельфе / О. Я. Тимофеев, Н. А. Вальдман, М. И. Крыжечевич // Арктика: экология и экономика. — 2014. — № 3 (15). — С. 79–85.

10. SECA Assessment: Impacts of 2015 SECA marine fuel sulphur limits. First drawings from European experiences. — Delft: CE Delft, 2016. — 45 p.
11. Живлюк Г. Е. Особенности развития экологически безопасных современных дизельных энергетических установок / Г. Е. Живлюк, А. П. Петров // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2017. — Т. 9. — № 3. — С. 581–596. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-3-581-596.
12. Resolution MEPC.259(68) (adopted on 15 May 2015) 2015 Guide-lines for exhaust gas cleaning systems. — 23 p.
13. Новиков Е. А. Определение серы в нефтепродуктах. Обзор аналитических методов / Е. А. Новиков // Мир нефтепродуктов. Вестник нефтяных компаний. — 2008. — № 1. — С. 28–33.
14. Новиков Е. А. Определение серы в нефтепродуктах. Обзор аналитических методов (Методы, основанные на окислении серы и последующем определении оксидов) / Е. А. Новиков // Там же. — 2008. — № 3. — С. 27–32.
15. Новиков Е. А. Определение серы в нефтепродуктах. Обзор аналитических методов (Методы по определению серы в нефтепродуктах при помощи рентгеновского излучения) / Е. А. Новиков // Там же. — 2008. — № 4. — С. 20–29.
16. Новиков Е. А. Определение серы в нефтепродуктах. Обзор аналитических методов (Методы атомно-эмиссионной спектроскопии с индуктивно связанной плазмой (АЭС-ИСП) / Е. А. Новиков // Там же. — 2008. — № 5. — С. 26–33.
17. Энергоресурсы, топливо // Сорта нефти. Маркерный стандарт, бенчмарк. [Электронный ресурс]. — Режим доступа: https://neftegaz.ru/tech_library/view/4758-Sorta-nefti.-Markernyj-standart-benchmark (дата обращения: 15.03.2016).
18. Орлов Е. И. Стандартизация в отрасли судового, тепловозного и промышленного двигателестроения / Е. И. Орлов, А. П. Петров, Г. Е. Живлюк // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2016. — № 4 (38). — С. 138–156. DOI: 10.21821/2309-5180-2016-8-4-138-156.
19. Леонтьева А. И. Очистка дизельного топлива. Десульфуризация адсорбционным методом / А. И. Леонтьева [и др.] // Деловой журнал Neftegaz.RU. — 2018. — № 8. — С. 62–70.
20. Иванченко А. А. Энергетическая эффективность судов и регламентация выбросов парниковых газов / А. А. Иванченко, А. П. Петров, Г. Е. Живлюк // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2015. — № 3 (31). — С. 103–112. DOI: 10.21821/2309-5180-2015-7-3-103-112.

REFERENCES

1. Sulphur 2020 — cutting sulphur oxide emissions. Web. 15 Sept. 2018 <<http://www.imo.org/en/mediacentre/hottopics/pages/sulphur-2020.aspx>>.
2. *Guidance to Shipping Companies and Crews on Preparing for Compliance with the 2020 'Global Sulphur Cap' for Ships' Fuel Oil in Accordance with MARPOL Annex VI*. London: Marisec Publications, 2019.
3. ISO statement on ISO 8217 and IMO 2020 0,50 % Sulphur fuels. Web. <<https://shipandbunker.com/news/world/482202-iso-statement-on-iso-8217-and-imo-2020-0,50-sulphur-fuels>>.
4. Global Sulphur Cap 2020 — extended and updated. Web. 22 Oct. 2018 <<https://www.dnvgl.com/maritime/publications/global-sulphur-cap-2020.html>>.
5. What you need to know: The 2020 IMO fuel sulphur regulation. Web. 16 Sept. 2018 <http://www.seatrade-maritime.com/images/PDFs/SOMWME-whitepaper_Sulphur-p2.pdf>.
6. Semenova, I. V. *Promyshlennaya ekologiya: ucheb, posobie dlya stud. vyssh. ucheb, zavedenii*. M.: Akademiya, 2009.
7. Latukhov, S. V., V. A. Nikitin, V.N. Okunev, et al. *Problemy ekologicheskoi bezopasnosti sudokhodstva: monografiya*. SPb: Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping, 2015.
8. Semanov, G. N. “Vrednye vybrosy v atmosferu ot sudov: na puti k standartam IMO.” *Nauka i transport. Morskoi i rechnoi transport* 1(5) (2013): 45–47.
9. Timofeev, O. Ya., N. A. Valdman, and M. I. Kryzhevich. “Specifics of Implementation of New Environmental Safety Requirements for Ships and Offshore Installations in Northern Seas and on the Arctic Shelf.” *Arctic: Ecology and Economy* 3(15) (2014): 79–85.

10. *SECA Assessment: Impacts of 2015 SECA marine fuel sulphur limits. First drawings from European experiences.* Delft: CE Delft, 2016.

11. Zhivljuk, Grigorij E., and Aleksandr P. Petrov. "Features of the development of environmentally safe modern diesel power plants." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 9.3 (2017): 581–596. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-3-581-596.

12. *Resolution MEPC. 259(68) (adopted on 15 May 2015) 2015 Guide-lines for exhaust gas cleaning systems.*

13. Novikov, E. A. "Opredelenie sery v nefteproduktakh. Obzor analiticheskikh metodov." *Mir nefteproduktov. Vestnik neftyanykh kompanii* 1 (2008): 28–33.

14. Novikov, E. A. "Opredelenie sery v nefteproduktakh. Obzor analiticheskikh metodov (Metody, osnovanye na okislenii sery i posleduyushchem opredelenii oksidov) (Prodolzhenie. Nachalo stat'i v №1, 2008)." *Mir nefteproduktov. Vestnik neftyanykh kompanii* 3 (2008): 27–32.

15. Novikov, E. A. "Opredelenie sery v nefteproduktakh. Obzor analiticheskikh metodov (Metody po opredeleniyu sery v nefteproduktakh pri pomoshchi rentgenovskogo izlucheniya) (Prodolzhenie. Nachalo v №1, 2008g.)" *Mir nefteproduktov. Vestnik neftyanykh kompanii* 4 (2008): 20–29.

16. Novikov, E. A. "Opredelenie sery v nefteproduktakh. Obzor analiticheskikh metodov (Metody atomno-emissionnoi spektrometrii s induktivno svyazannoi plazmoi (AES-ISP)." *Mir nefteproduktov. Vestnik neftyanykh kompanii* 5 (2008): 26–33.

17. *Energoresursy, toplivo // Sorta nefti. Markernyi standart, benchmark.* Web. 15 March 2016 <https://neftegaz.ru/tech_library/view/4758-Sorta-nefti.-Markernyj-standart-benchmark>.

18. Orlov, Evgenij Ivanovich, Aleksandr Pavlovich Petrov, and Gregory Evgenyevich Zhivlyuk. "Standardization in the industry of ship, locomotive and industrial engine." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 4(38) (2016): 138–156. DOI: 10.21821/2309-5180-2016-8-4-138-156.

19. Leont'eva, A. I., A. V. Vyghanov, N. N. Balobaeva, K. Kh. K. Al'-Fadkhli, and A. Ch. A. Al'mansuri. "Ochistka dizel'nogo topliva. Desulfurizatsiya adsorbtsionnym metodom." *Delovoi zhurnal Neftegaz.RU* 8 (2018): 62–70.

20. Ivanchenko, A. A., A. P. Petrov, and G. E. Zhivljuk. "Energy efficiency of ships and regulation of greenhouse gas emissions." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 3(31) (2015): 103–112. DOI: 10.21821/2309-5180-2015-7-3-103-112/.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Петров Александр Павлович —
 кандидат технических наук, доцент
 ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
 С. О. Макарова»
 198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
 ул. Двинская 5/7
 e-mail: app.polab@inbox.ru, kaf_dvs@gumrf.ru
Живлюк Григорий Евгеньевич —
 кандидат технических наук, доцент
 ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
 С. О. Макарова»
 198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
 ул. Двинская, 5/7
 e-mail: spb-engine-prof@mail.ru, kaf_dvs@gumrf.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Petrov, Aleksandr P. —
 PhD, associate professor
 Admiral Makarov State University of Maritime
 and Inland Shipping
 5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,
 Russian Federation
 e-mail: app.polab@inbox.ru, kaf_dvs@gumrf.ru
Zhivljuk, Grigorij E. —
 PhD, associate professor
 Admiral Makarov State University of Maritime
 and Inland Shipping
 5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,
 Russian Federation
 e-mail: spb-engine-prof@mail.ru, kaf_dvs@gumrf.ru

Статья поступила в редакцию 29 января 2019 г.

Received: January 29, 2019.