

DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-4-727-744

ECOLOGICAL SAFETY OF SHIP INTERNAL COMBUSTION ENGINES. SELECTING THE EFFICIENT METHOD COMPLIANCE WITH THE NEW REQUIREMENTS OF 2020 FOR SULFUR EMISSIONS

G. E. Zhivljuk, A. P. Petrov

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

A global sulfur limit of 0.50% in used fuel will come into force in 2020, and more than 70,000 ships will be affected by the regulation. In such circumstances, ship operators inevitably face the problem of an ambiguous choice of how to meet the new requirements. The following variants can be considered as compliance options: switching to power the low-sulfur fuel, the availability and price of which has not been finally determined yet; using the heavy sulfur fuels with retrofitting the power plants by the scrubber systems; modernization of the vessel with switching installation to use the gaseous fuel, and, finally, the use of alternative fuels (methanol, biofuel, hydrogen).

The problem of choosing the conformity method can be solved on the basis of analyzing the payback period of the projects for the vessels modernization compared with the trivial transition to use the liquid low-sulfur fuels corresponding the requirements that do not require significant changes in the design of the power plant. At the same time, the effectiveness of selecting the basic compliance options in the form of using open-loop scrubber systems, hybrid scrubbers and using the liquefied natural gas is closely dependent on the vessels types and the power of their power plants. In this regard, it is advisable to group and consider the different types of vessels in the power series up to 5 MW, 5-10 MW and 10-40 MW. The results of this analysis carried out in the work allow us to identify the main trends in the development of the commercial fleet under the conditions of the new regulation.

In general, the proposed analysis materials highlight the further prospects for the development of the fleet's energy installations to ensure the reduction of sulfur oxide emissions in accordance with the requirements of the International Maritime Organization, which will come into force on January 1, 2020.

Keywords: Ship power plant, environmental safety, IMO requirements, SOx emission, control zones, compliance methods, scrubber, liquefied natural gas, heavy fuels, modernization, choice of option.

For citation:

Petrov, Aleksandr P., and Grigorij E. Zhivljuk. "Ecological safety of ship internal combustion engines. Selecting the efficient method for compliance with the new requirements of 2020 for sulfur emissions." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 11.4 (2019): 727-744. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-4-727-744.

УДК 621.43.074

ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ СУДОВЫХ ДВС. ВЫБОР ЭФФЕКТИВНОГО СПОСОБА СООТВЕТСТВИЯ НОВЫМ ТРЕБОВАНИЯМ 2020 г. ПО ВЫБРОСАМ СЕРЫ

Г. Е. Живлюк, А. П. Петров

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

Отмечается, что глобальные ограничения по содержанию серы в размере 0,50 % в используемом топливе вступят в силу в 2020 г., и регулированием будет затронуто более 70 000 судов. В таких условиях операторы судов неизбежно сталкиваются с проблемой неоднозначного выбора способа соответствия новым требованиям. В качестве вариантов соответствия могут рассматриваться: переход на питание низкосернистым топливом, доступность и цена которого до сих пор окончательно не определена, использование тяжелых сернистых топлив с дооснащением энергетических установок скрубберными системами, модернизация судна с переводом установки на использование газообразного топлива и, наконец, использование альтернативных видов топлива (метанол, биотопливо, водород). Особое внимание обращается

на то, что проблема выбора способа соответствия может быть решена на основе анализа срока окупаемости проектов модернизации судов по отношению к тривиальному переходу к использованию жидких низкосернистых, соответствующих требованиям, топлив, не предусматривающих значительных изменений в конструкции энергетической установки судна. При этом эффективность выбора основных вариантов соответствия в виде использования скрубберных систем с открытым контуром, гибридных скрубберов и сжиженного природного газа находится в тесной зависимости от типов судов и мощности их энергетических установок. В этой связи целесообразно сгруппировать и рассмотреть разные типы судов в мощностных рядах до 5 МВт, 5–10 МВт и 10–40 МВт. Результаты такого анализа, проведенного в данной работе, позволяют выявить основные тенденции развития коммерческого флота в условиях нового регулирования. В целом предлагаемые материалы анализа выделяют дальнейшие перспективы развития энергетических установок флота в целях обеспечения сокращения эмиссии оксидов серы в соответствии с требованиями Международной морской организации, вступающими в силу с 1 января 2020 г.

Ключевые слова: судовая энергетическая установка, экологическая безопасность, требования ИМО, эмиссия SO_x , зоны контроля, способы соответствия, скруббер, сжиженный природный газ, тяжелые топлива, модернизация, выбор варианта.

Для цитирования:

Живлюк Г. Е. Экологическая безопасность судовых ДВС. Выбор эффективного способа соответствия новым требованиям 2020 г. по выбросам серы / Г. Е. Живлюк, А. П. Петров // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2019. — Т. 11. — № 4. — С. 727–744. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-4-727-744.

Введение (Introduction)

Наибольший ущерб окружающей среде от судоходства 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 [1]. Предлагаемые материалы являются логическим продолжением статьи [2], посвященной рассмотрению проблем, связанных с предстоящим введением Международной морской организацией — International Maritime Organization (IMO) в 2020 г. глобальных ограничений по содержанию серы в используемом топливе и эмиссии SO_x судовыми энергетическими установками.

Как отмечалось в публикации [2], достижение нормативных показателей по эмиссии SO_x может быть получено в результате использования специальных видов низкосернистых топлив либо путем очистки в специальных периферийных устройствах — скрубберах отработавших газов двигателей, работающих на традиционных высокосернистых сортах топлива — High-Sulphur Fuel Oil (HSFO)¹.

Новое регулирование затрагивает интересы операторов и судовладельцев более 70 000 разнообразных видов судов. Поэтому поиск и выбор оптимального решения по соответствию требований в каждом конкретном случае связаны с разносторонним рассмотрением многофакторных аспектов проблемы. При рассмотрении проблем достижения соответствия новым требованиям необходимо принять во внимание, что помимо ожидаемого экологического эффекта, внедрение глобального ограничения содержания серы в используемом топливе также будет иметь другие последствия для судоходства. К последним следует отнести: воздействие на выбросы парниковых газов, увеличение расходов на топливо и различные топливные смеси, изменения эксплуатационных характеристик судов, а также влияние на стоимость активов.

Целью статьи является анализ влияния различных факторов на выбор стратегии соответствия различных видов судов новым требованиям ИМО по сокращению выбросов серосодержащих продуктов с отработавшими газами судовых ДВС.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Воздействие на парниковые газы и другие выбросы. Прежде чем перейти к непосредственному анализу возможных технических решений, касающихся достижения соответствия но-

¹ 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).

вым требованиям ИМО по эмиссии оксидов серы, необходимо обратить внимание на взаимосвязь проблемы с сопутствующими вопросами обеспечения экологической безопасности судовых энергетических установок. Доступные варианты достижения соответствия требованиям по глобальному ограничению эмиссии серы неизбежно окажут влияние на выбросы парниковых газов и NO_x судовыми двигателями. Техническое регулирование выбросов парниковых газов, выходящее за рамки требований энергоэффективности судов (Energy Efficiency Design Index (EEDI) [3], находится в повестке дня ИМО после того, как стратегия была согласована в апреле 2018 г. Поэтому выполненный выбор способа соответствия может оказать влияние на соблюдение будущих правил сокращения выбросов парниковых газов. В равной мере в зависимости от технологии ограничения эмиссии серы выбор способа соответствия окажет влияние на достижение требований стандарта Tier III по выбросам NO_x .

Перевод энергетической установки на морской газойль (Marine Gas Oil) MGO, дистилляты или смешанное топливо будет поддерживать выбросы парниковых газов и NO_x на текущих уровнях. Использование скрубберов в сочетании с высокосернистым тяжелым топливом HSFO, содержание серы в которых определяется известными методами [4]–[7], приведет к небольшому увеличению расхода топлива, порядка 3–5 %, и соответствующему увеличению выбросов парниковых газов. При этом соответствие стандартам NO_x Tier III может быть достигнуто с помощью систем селективного каталитического восстановления — Selective Catalytic Reduction (SCR) или рециркуляции отработавших газов — Exhaust Gas Recirculation (EGR), но в некоторых случаях использование таких систем окажется намного сложнее в сочетании с технологией скруббера.

В то же время использование LNG — Liquefied Natural Gas (сжиженный природный газ) приведет к сокращению выбросов ПГ на 10–20 % в зависимости от вида двигателя. Газовые двигатели низкого давления имеют определенное количество метана на выпуске, что снижает потенциальные преимущества, но они обеспечивают соответствие уровням по эмиссии NO_x по Tier III. Системы высокого давления исключают выбросы метана, но требуют использования SCR или EGR для снижения NO_x до уровней уровня Tier III. Другие альтернативные виды топлива, такие как биотопливо или водород, могут привести к еще более резкому сокращению выбросов парниковых газов в зависимости от того, как эти топлива производятся, однако в зависимости от характеристик альтернативных видов топлива и особенностей его горения могут потребовать использования системы восстановления NO_x .

Технические и операционные риски для скрубберных систем. Накопленный опыт, в том числе DNV GL^{1, 2, 3, 4}, [8]–[10], на основе 170 завершенных проектов использования скрубберов позволяет сформировать представление о технических и эксплуатационных рисках для всех типов скрубберных систем. Основные темы, требующие особого внимания для успешной установки и эксплуатации, можно резюмировать следующим образом.

Во-первых, наличие надежного контрольного оборудования является ключевым, поскольку оно служит основой для подтверждения соответствия системы. В первую очередь это касается датчиков и анализаторов для отработавших газов и промывочной воды. Такие измерительные устройства обычно используются в наземных приложениях и их необходимо адаптировать для использования в составе судовой энергетической установки.

Во-вторых, вода после промывки имеет низкий уровень pH и является очень коррозионно-активной. Поэтому компоненты, контактирующие с ней (водоразборные водопроводные трубы

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 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).

³ 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).

⁴ 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).

и клапаны в зонах сброса воды из скруббера), должны обладать достаточной стойкостью к коррозии. В табл. 1 рассмотрены вопросы, связанные с эксплуатационной надежностью скрубберов с открытым циклом. Некоторые дополнительные риски необходимо учитывать для замкнутых и гибридных скрубберов. Эти риски могут быть смягчены путем тщательного проектирования системы и выбора материалов.

Таблица 1

Эксплуатационные риски скрубберов открытого цикла

Подсистема	Опасности и риски	Причины	Следствия
Забора и подачи морской/ заборной воды	Потеря снабжения морской водой из-за забивания приемных фильтров	Накопление отложений в кингстонных ящиках. Кингстонный ящик забит песком или мусором	Отключение скруббера
	Снижение производительности насоса заборной воды из-за дросселирования входа	Облитерация отводов труб на входе насоса	Снижение надежности насоса, возможность отказа
	Прекращение подачи заборной воды из-за отказа насоса (-ов) морской воды	Механическая поломка, электрическая неисправность	Отключение скруббера
	Внешняя утечка перед башней скруббера	Трещина / разрыв трубопровода морской воды. Чрезмерное давление. Закрытые клапаны. Коррозия / Эрозия	Затопление машинного отделения
Удаления промывочной воды	Слив воды не соответствует пределу pH VGP США (не менее шести)	Конструкция не включает решение для повышения pH промывочной воды перед сливом	Использование MGO / совместимого топлива в территориальных водах США
	Коррозия заборного патрубка	Плохое покрытие или качество установки	Отключение скруббера. Ремонт выпускных труб в эксплуатации
	Коррозия клапанов в линии слива промывочной воды	Коррозия из-за низкого pH промывочной воды. Несоответствующие свойства материала. Нарушение технологии обработки и установки	Простой скруббера
	Внешняя утечка после скрубберной башни	Трещина / разрыв промывной водопроводной трубы. Чрезмерное давление. Закрытые клапаны. Коррозия / Эрозия	Затопление машинного отделения
	Турбулентность, создающая газ в промывочной воде	Отсутствие функции дегазации в сливной линии	Видны пузырьки газа. Возможно несоблюдение требований по промывочной воде скруббера

Продолжение табл. 1

Скрубберной башни	Сажа в скрубберной воде и на палубе	Накопление сажи при работе, выброс при быстром изменении нагрузки двигателя	
	Противодавление в выпускной линии превышает предел	Недостаточный объем конструкции скруббера	Тепловая перегрузка двигателя. Снижение мощности. Повышенный расход топлива
	Затопление скрубберной башни	Засорен сливной трубопровод. Ошибочная работа клапана. Отказ тревоги высокого уровня	Затопление машинного отделения, попадание воды в цилиндры двигателя — гидроудар
	Трещины или деформация скрубберной башни	Коррозия. Неправильная сварка. Неправильная установка. Механическое напряжение между деталями скруббера (башня и трубка Вентури)	Затопление машинного отделения
	Засорение демистера скрубберной башни	Недостаточная очистка демистера. Распылительные форсунки не покрывают всю площадь	Увеличение противодавления. Появление сажи
	Коррозия / эрозия сопел скруббера	Коррозия из-за низкого pH промывочной воды. Несоответствующие свойства материала	Более низкая эффективность распыления. Повреждение трубопровода или насоса из-за повышенного давления. Заблокированные / поврежденные клапаны ниже по течению
	Недостаточная эффективность скруббера	Конструкция / размер башни не подходит для расхода отработавших газов и времени удержания. Размеры капель и объема воды не оптимальны	Несоответствующие выбросы в атмосферу
	Поток отработавших газов через колонну без работающих насосов морской воды	Отключение насоса морской воды (ложная или фактическая тревога). Выпускные клапаны в неправильном положении при запуске двигателя. Воздушная функция выхлопных клапанов неэффективна	Плавление пластмассовых / низкотермостойких компонентов в башне

Окончание табл. 1

Выхлопных труб	Протекающий сильфон-компенсатор на входе и выходе скрубберной башни	Тепловое расширение / деформация трубопроводов и связанных с ними компонентов в башне	Отключение скруббера
	Коррозия выхлопной трубы после скруббера	Кислотная среда. Деградация материала из-за коррозии	Утечка в выхлопной трубе. Нарушения потока. Время простоя скруббера
	Внутренняя утечка в перепускных клапанах отработавших газов	Потеря способности полного закрытия клапанов. Отказ уплотнения вентилятора	Внутренняя утечка в обводную линию. Выпускной поток через скруббер и байпас. Неисправность, требующая перехода на MGO
	Взрыв из выхлопной трубы	Главный клапан и перепускной клапан находятся в закрытом положении при запуске основного или вспомогательного двигателя	Повреждения выхлопной трубы. Структурные повреждения.
Контроля эмиссии	Низкая надежность системы непрерывного контроля выбросов	Засорение линии отбора проб из-за накопления сажи. Засорение фильтра. Кристаллизация в линии проб. Электрическая неисправность. Отказ насоса. Отработавшие газы недостаточно охлаждены	Неадекватные данные или их отсутствие. Неисправность, требующая перехода на MGO
Автоматизации и управления	Ненадежная система автоматизации и управления	Внутренний не обнаруженный сбой датчика. Неопределенная неисправность кабеля. Ошибка входа контроллера	Неправильная операция. Непреднамеренное отключение системы. Задержка аварийного реагирования
Корпус и конструкция	Коррозия на корпусе в зоне слива промывочной воды	Вода с низким pH	Структурная деградация материала конструкции

Цены и наличие малосернистого топлива. Внедрение глобального ограничения по выбросам серы продолжает приводить к продолжительным дискуссиям о будущем наличии топлива с низким содержанием серы, а также о возможном динамическом развитии цен¹. Прогнозирование будущей цены на топливо действительно является сложной задачей, но ожидается, что переход на топливо более высокого качества, скорее всего, приведет к значительно более высоким расходам.

Стоимость различных сортов топлива традиционно тесно коррелирует с ценами на нефть. Однако такая корреляция не должна использоваться для будущих прогнозов. Совершенствование разработок и наращивание производства низкосернистых топливных смесей приведет к увеличению спроса на дистилляты и, скорее всего, к росту цен вверх. В то же время отсутствие спроса на HSFO может снизить его цену. Таким образом, в будущем можно будет наблюдать расширение

¹ 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).

разрыва между двумя конкурирующими топливными решениями, причем HSFO (в сочетании со скруббером) устанавливает нижний уровень цен, а MGO определит верхний уровень.

После введения зон контроля эмиссии оксидов серы Sulphur Emission Control Areas (SECA) (зона контроля за содержанием серы в выбросах) [11] большинство операторов просто переключились на топливо MGO или Marine Diesel Oil (MDO). Аналогичная тенденция с более ярким проявлением ожидается к 2020 г., поэтому в ближайшее время рост цен на MGO неизбежен. По мере постепенного введения в производство гибридных видов топлива с низким содержанием серы (0,50 % серы) можно прогнозировать, что цены на дистилляты, в конечном итоге, выравниваются. Однако если существенная разница цен между традиционными HSFO и совместимыми видами топлива сохранится в обозримом будущем, то альтернативные решения, такие как скрубберы или использование LNG в качестве судовых топлив, могут оказаться предпочтительным решением.

Наличие топлива в портах является еще одной проблемой для судовладельцев и операторов. В частности, прогнозирование доступности топлива с содержанием серы менее 0,50 % в настоящее время крайне затруднительно, поскольку многие нефтеперерабатывающие заводы находятся на стадии разработки этих продуктов. Доступность HSFO также является проблемой для тех, кто устанавливает скрубберы. Несмотря на то, что многие HSFO останутся в производстве в качестве побочного продукта процессов переработки, высокосернистые топлива могут оказаться малодоступными во многих портах из-за отсутствия спроса. Однако ожидается, что HSFO будет доступен во всех основных местах бункеровки. Таким образом, основные результаты можно представить в виде табл. 2.

Таблица 2

Предполагаемые результаты использования способов соответствия

Способы соответствия	Эмиссия SO _x	Выбросы парниковых газов	Эмиссия NO _x
MGO, дистилляты, смешанное топливо	Снижение до уровня менее 0,50 или 0,10 %	Без изменений	Без изменений, EGR или SCR требуется для достижения уровня Tier III
Скрубберы с HSFO	Снижение до уровня менее 0,50 или 0,10 %	Небольшое увеличение в 3–5 %	Без изменений, EGR или SCR требуется для уровня NO _x III, повышенная сложность компоновки в связи с комбинацией со скруббером
LNG	Устранена полностью	10–20 % снижения в зависимости от конструкции двигателя	Снижение на 20–80 % в зависимости от вида двигателя, для двигателей высокого давления требуется SCR или EGR для соответствия требованиям Tier III

Обновление и использование флота. Ожидаемое увеличение затрат на топливо, как полагают многие аналитики отрасли, приведет к определенному замедлению снижения операционных расходов. По той же причине усилия будут сконцентрированы на мероприятиях, направленных на повышение энергоэффективности. Более конкурентоспособными будут признаны энергоэффективные суда. Суда, оборудованные скрубберами, могут получить значительное конкурентное преимущество. Ожидается, что первоначально суда со скрубберами смогут обеспечить премиальные тарифы на фрахт. При этом, если большинство судов в определенном сегменте устанавливают скрубберы, то ставки окажутся в результате сниженными. Те суда, на которых еще

не будут внедрены технологии скруббера, будут вынуждены сократить свои ставки до неустойчивых уровней и, в конечном итоге, они могут быть вытеснены с рынка. Поэтому судовладельцам очень важно отслеживать конкуренцию в своем сегменте, чтобы гарантировать свои доминирующие положения на рынке оказания транспортных услуг.

Существенные инвестиции, необходимые для сохранения конкурентоспособности в условиях глобального режима ограничения эмиссии оксидов серы, в сочетании с расходами, связанными с системами очистки балластных вод, могут привести к тому, что более старые суда будут невыгодными для дальнейшей эксплуатации, что может служить причиной более высокой активности утилизации, а затем и обновления флота с использованием современных, более эффективных судов. Такая тенденция может также ускорить внедрение альтернативных видов топлива, таких как LNG.

Влияние на страховые взносы. Морское страхование также будет затронуто предстоящими правилами в отношении серы. Поставщики страховых услуг обеспокоены потенциальными повреждениями, потерей работоспособности двигателей и другими возникающими проблемами, которые могут быть вызваны введением новых топливных продуктов, свойства которых до сих пор не совсем понятны. Кроме того, существует потенциал для нарушения графика перевозок и задержек из-за отсутствия соответствующего совместимого топлива в бункерном порту или из-за механических сбоев, вызванных плохим качеством топлива для бункера. Ожидается, что страховщики морских грузов и перевозок пересмотрят свою политику для покрытия таких случаев, когда груз не будет поврежден, но транспортировка окажется более продолжительной из-за проблем, связанных с ограничением глобальных выбросов оксидов серы. Новые проблемы могут привести к тому, что страховщики смогут принять риски, увеличив свои премии, отражая тем самым неопределенности новой реальности.

Оговорки, касающиеся бункеровки, также должны быть пересмотрены во избежание споров. Заметным примером являются цены на различные виды топлива. В частности, когда фрахтователь, который принимает судно, покупает топливо, находящееся на борту и повторно продает его владельцу после повторной поставки. Во время перехода к новым ограничениям выбросов серы может иметь место большая разница в ценах на топливо и этот риск должен учитываться в чартерной партии. К другим рискам относятся также недоступность совместимого топлива и изменение производительности судна в зависимости от качества топлива.

Подход к анализу альтернативных решений. В связи с приближением сроков введения ограничений судовладельцам необходимо как можно скорее рассмотреть стратегии и планы того, как соблюдать новые требования по эмиссии оксидов серы¹. Чтобы сделать предварительные прогнозы для принятия решения по выбору способа соответствия новым требованиям, необходимо провести сравнительный анализ эффективности и целесообразности использования скрубберов, LNG или других вариантов соответствия. Этот прогноз будет зависеть от ряда факторов, включая, но не ограничиваясь следующими факторами:

- ценами на топливо: ожидаемый, будущий разброс цен между соответствующими топливами, HSFO и LNG;
- наличием HSFO или совместимых топлив в портах, обычно используемых для бункеровки;
- инвестиционными затратами по каждому варианту;
- расходами на топливо, которые предполагает к использованию владелец или фрахтователь (сможет ли судно обеспечить более высокие ставки чартера, если используются, например, LNG или скрубберы);
- местными правилами, ограничивающими работу скруббера (нужен разомкнутый или гибридный скруббер);
- эксплуатационными расходами, включая расходы на техническое обслуживание и ремонт, а также расходы на обучение экипажа.

¹ 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).

Таким образом, необходимо выполнить сравнение затрат на установку скруббера и использование LNG или совместимых альтернативных топлив для энергетических установок в диапазоне мощностей главного двигателя от 5 до 40 МВт. «Сценарии анализа» являются общими, а выводы будут зависеть от фактического эксплуатационного профиля каждого судна и сделанных допущений.

Для проведения дальнейшего анализа необходимо принять исходные данные, которые сводятся к следующему:

1. Сравнение затрат, основанное на разнице цен между совместимыми видами топлива и альтернативными вариантами соответствия.

2. Ожидание в перспективе превышения цен на низкосернистые топлива за тонну по сравнению с ценой HSFO, что может достигать в нижнем пределе 40 долл. США, в верхнем — 365 долл. США. Базовая разница цен, принимаемая для анализа, составляет 200 долл. США за тонну. При этом абсолютная цена распространенных альтернативных видов топлива будет варьироваться в зависимости от колебаний цен на HSFO).

3. Работа на HSFO со скруббером с открытым контуром или гибридным скруббером, связанная с инвестициями в установку скруббера и увеличением эксплуатационных расходов. (Гибридные скрубберы имеют более высокие затраты на установку и эксплуатацию по сравнению с разомкнутым контуром). Кроме того, для скрубберов сделаны дополнительные допущения:

- системы скрубберов увеличивают расход топлива судна примерно на 3–5 %;
- время простоя скрубберных систем приведет к затратам на эксплуатацию совместимого топлива;
- установка систем скрубберов приведет к увеличению стоимости обслуживания (больше для гибридного / замкнутого контура);
- для гибридных и замкнутых систем неизбежны дополнительные затраты на поставку щелочей и утилизацию твердых остатков.

4. Альтернатива LNG имеет инвестиционные затраты на системы хранения, систему управления топливом и конверсию двигателя, а эксплуатационные расходы зависят от предполагаемой цены на LNG. Эта цена в данном случае устанавливается на основе цен в Европе и Северной Америке, исходя из предположения, что цены колеблются от 8 до 10 долл. США / ММВТУ.

Оценка вариантов соответствия. Анализ выполняется для трех вариантов мощности судовых энергетических установок, данные по которым приведены в табл. 3.

Таблица 3

Анализируемые энергетические установки

Мощность установки	5 МВт	10 МВт	40 МВт
Расход топлива главным двигателем, т/год	2,800	5,700	22,800
Расход топлива вспомогательными двигателями, т/год	400	800	3,000

Основные параметры скрубберной системы, принятой для анализа представлены в табл. 4.

Таблица 4

Предполагаемые параметры скрубберной системы

Параметры	Значение
Производительность насоса забортной воды (м ³ /МВт·ч)	50
Увеличение расхода топлива, %	2
Время простоя скруббера, дней в году	14
Потребление реагента (гибридный скруббер), л / МВт·ч	19
Производство шлама, кг / МВт·ч	5
Время за пределами SECA, %	75
Время работы по замкнутому контуру, %	15

Результаты анализа могут быть рассмотрены с точки зрения времени окупаемости модернизации по сравнению с использованием малосернистых топлив, как показано на рис. 1, откуда следует, что срок окупаемости скрубберных систем сокращается с увеличением мощности установки, поэтому установка скруббера представляется наиболее целесообразной для крупных судов с высоким расходом топлива. В то же время при выборе способа соответствия для небольших судов перевод на LNG может быть более привлекательным решением, чем установка скрубберных систем.

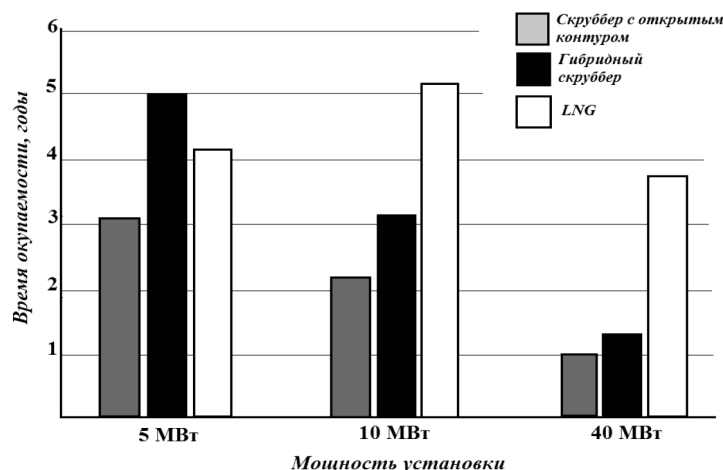


Рис. 1. Время окупаемости разомкнутых и гибридных скрубберов и СПГ

Наряду со сроком окупаемости, существуют и другие факторы, которые следует учитывать при принятии решения о выборе способа соответствия новым требованиям ИМО. Некоторые особенности выбора для различных судов рассматриваемого ряда представлены на рис. 2. Типичными видами судов с мощностью двигателя порядка 5 MWt (см. рис. 2, а) являются челночные танкеры, навалочные суда, пассажирские и круизные суда и небольшие контейнеровозы. Для таких судов, из-за низкого расхода топлива, время окупаемости скруббера относительно велико.

В рассматриваемом случае для скруббера с открытым контуром время окупаемости составляет около трех лет, для гибридного скруббера — пять лет. Перевод судна на LNG в качестве топлива имеет срок окупаемости порядка четырех лет. При этом в долгосрочной перспективе (с 10 до 15 лет) LNG может обеспечить значительную экономию для судна такого размера, предполагая, что цены на LNG будут формироваться на конкурентной основе. Довольно часто такие суда могут работать в течение длительного периода времени в зонах SECA или в зонах с ограничениями на слив промывочной воды скруббера. В этом случае LNG может быть очень привлекательным вариантом, позволяющим соблюдать одновременно ограничения как SO_x , так и NO_x , одновременно обеспечивая сокращение выбросов ПГ на 10–20 %. Кроме того, размер скруббера и необходимого для него пространства может являться проблемой для небольших судов [12].

Проведем аналогичное рассмотрение проблем модернизации судов с мощностью энергетической установки 10 MWt. К данной категории судов относятся танкеры MR, навалочные машины Panamax и контейнеровозы. Для этих судов скрубберы имеют срок окупаемости от двух до трех лет, тогда как окупаемость перевода на LNG оценивается в пять лет, как следует из графиков на рис. 2, б и диаграмм на рис. 1. В зависимости от эксплуатационного профиля, а именно: плавание в зонах SECA, тип торговли (постоянные или изменяющиеся маршруты следования), могут быть рассмотрены различные решения. Несмотря на то, что бункерная инфраструктура для LNG разрабатывается и развивается во всем мире, для судов, совершающих перевозки по постоянно меняющимся направлениям, неразвитая инфраструктура LNG в настоящее время может сделать невозможным использование газообразного топлива. Одновременно необходимо принимать во внимание возможность того, что в 2020 г. HSFO не будет легкодоступным во всех портах,

что может сказаться на окупаемости проекта модернизации некоторых судов с установкой скрубберных систем.

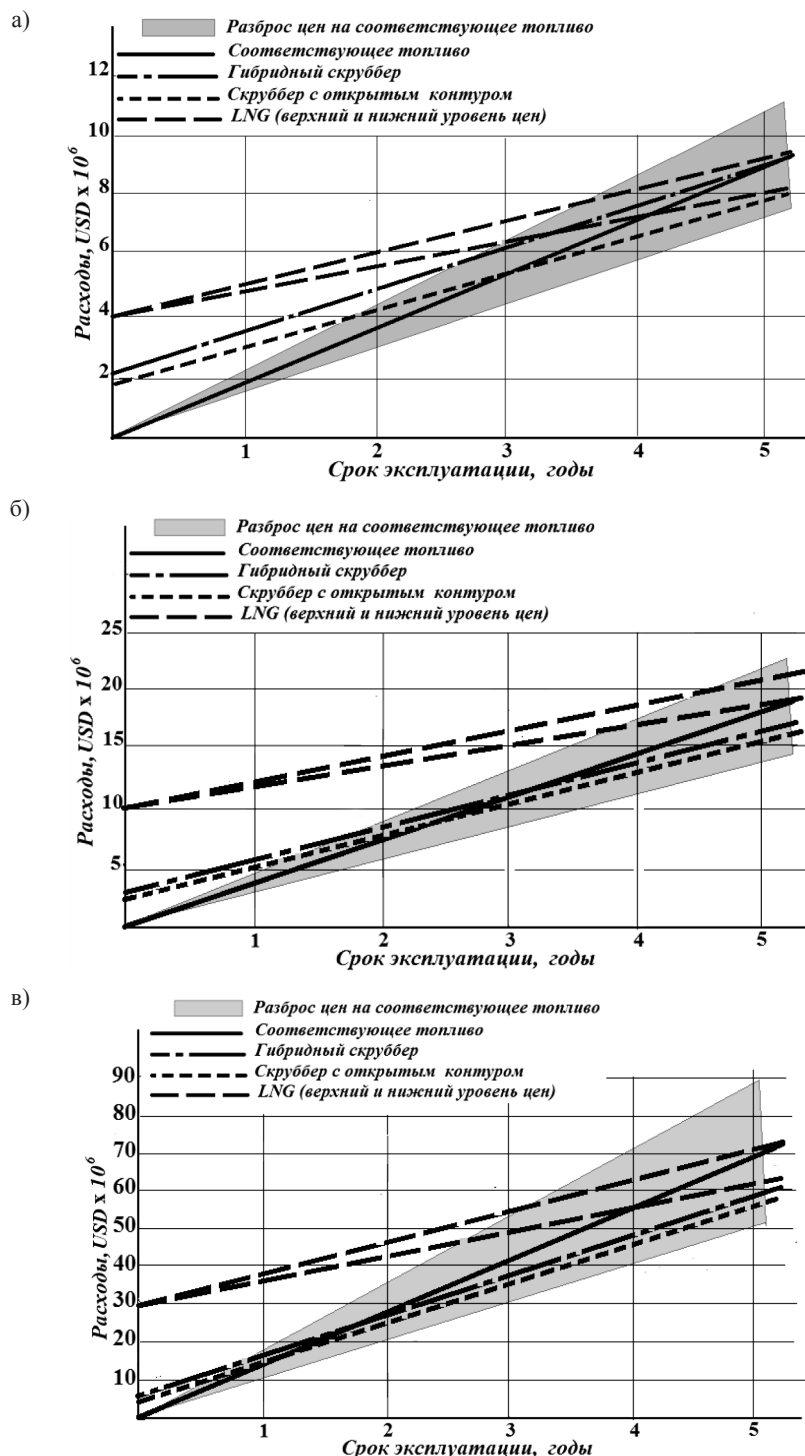


Рис. 2. Совокупные расходы судна с энергетической установкой:
а — 5 МВт; б — 10 МВт; в — 40 МВт

Типичными судами, мощность энергетической установки которых составляет 40 МВт (см. рис. 2, в), являются контейнерные и круизные суда. Для таких судов время окупаемости установки скрубберов разомкнутого контура составляет чуть больше года, а гибридного — около двух. Время окупаемости перехода на LNG в качестве топлива может составлять приблизительно от четырех и более лет (в зависимости от разброса цен на газовое и совместимое топливо).

Следует отметить, что при выборе решения соответствия между контейнерными и пассажирскими судами могут быть существенные различия. С одной стороны, большая часть расхода топлива судами-контейнеровозами происходит вдали от районов с потенциальными ограничениями в работе скрубберов и это обстоятельство делает скрубберы с открытым контуром лучшим решением ввиду их относительно низкой стоимости и простоты эксплуатации. С другой стороны, круизные суда могут осуществлять плавание в зонах SECA или вблизи прибрежных районов, где часто введены ограничения на сброс промывочной воды скруббера. В этом случае инвестирование в LNG может быть наиболее подходящим решением, учитывая долгосрочную перспективу.

В целом время окупаемости вариантов соответствия для каждого судна будет зависеть не только от мощности энергетической установки, но и от необходимой массы топлива на борту, поскольку объем топливных танков — один из наиболее важных элементов затрат при переводе судовой энергетической установки на LNG в качестве топлива. Фактический рабочий профиль каждого судна, включая время, проведенное в зонах SECA или в областях с ограничениями на слив скрубберной воды, также окажет влияние на выбор способа соответствия.

Важность стоимости топлива становится очевидной, если проанализировать распределение затрат по основным категориям, представленное на рис. 3. Неопределенность цен на топливо может сыграть важную роль в результатах каждого решения. Для крупных судов с высоким потреблением топлива инвестирование в скруббер может быть выгодным даже при низких уровнях цен на совместимое низкосернистое топливо. Напротив, для небольших судов может быть более привлекательным решением использования LNG в случае принятия во внимание долгосрочных перспектив. Кроме того, оптимальное решение в выборе способа соответствия будет зависеть не только от времени окупаемости, но и от других факторов, таких как выбросы парниковых газов, экологическая безопасность энергетической установки и долгосрочный потенциал формирования суммарных затрат на эксплуатацию судна.

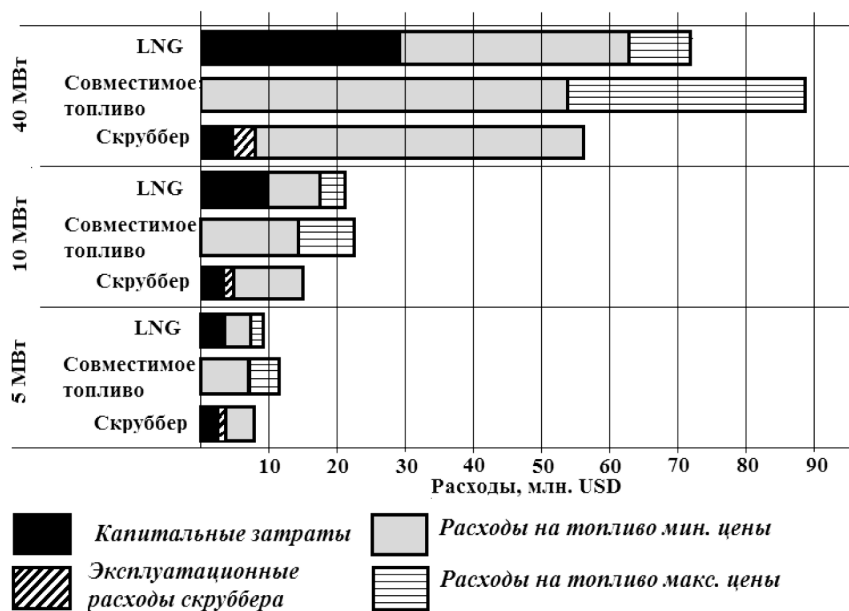


Рис. 3. Накопленные расходы в течение пяти лет с учетной ставкой 6 %

Ранее изложенное находит свое отражение в современных реалиях. В целях достижения соответствия требованиям по глобальному ограничению серы в используемом топливе на уровне 0,50 % судовладельцы вынуждены предпринимать определенные действия по готовности к 2020 г. Например, по данным DNV GL по состоянию на август 2018 г. более 1200 судов либо устанавливали, либо заказывали скрубберы, которые должны быть установлены к 2020 г. Тенденции динамики роста количества судов со скрубберными системами показано на рис. 4. Более

половины этих заказов были размещены весной/летом 2018 г. Ожидается, что еще некоторое количество судов будут оборудоваться скрубберными системами в ближайшее время, но вопрос в том, когда эти системы будут установлены, остается открытым, поскольку многие производители и поставщики датчиков и анализаторов выбросов уже работают в полную силу. В любом случае ожидается, что к 2020 г. скрубберы будут установлены, как минимум, на 2000 судах, а остальная часть флота будет ориентироваться на соответствующее топливо. Таким образом, промышленность, в том числе банки, финансовые учреждения, фрахтователи и судовладельцы, готовы инвестировать средства в установку скрубберных систем в обмен на потенциальную выгоду от ожидаемой экономии на стоимости топлива [13].

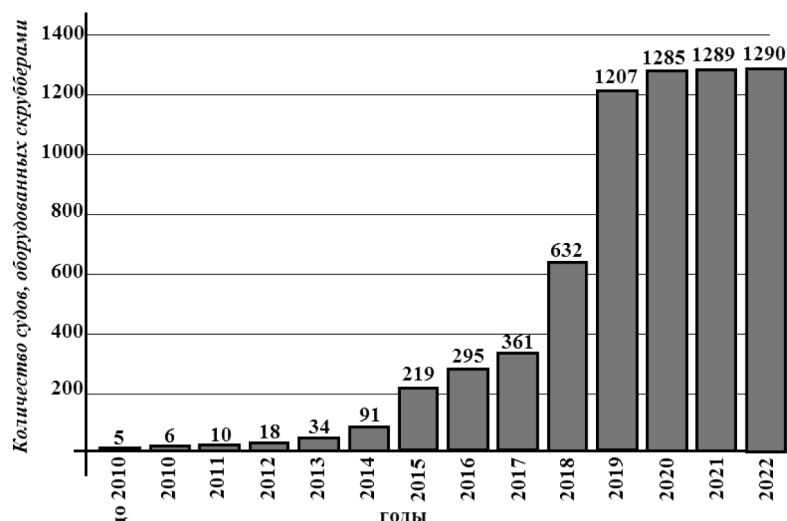


Рис. 4. Совокупное количество судов со скрубберами (установленными или заказанными) по данным DNV GL

Необходимо отметить, что до начала 2018 г. большинство скрубберов были установлены или заказаны для круизных и пассажирских судов, работающих в зонах контроля SECA. До 50 % этих систем были замкнутыми или гибридными конструкциями, чтобы обеспечить работу в ограниченных зонах, таких как определенные порты в Северной Америке.

Как показано на рис. 5, навалочные суда (балкеры), танкеры и контейнеровозы представляют собой три сегмента с наибольшим количеством скрубберов.

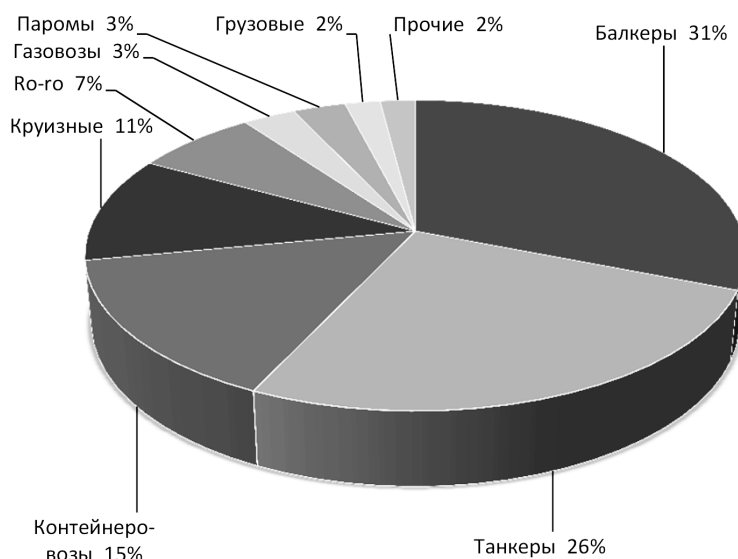


Рис. 5. Доля различных типов судов в заказах скруббера

Системы с разомкнутым контуром, безусловно, являются наиболее популярными в настоящее время благодаря их относительной простоте, особенно для дооснащения существующих судов, как показано на рис. 6, по данным DNV GL.

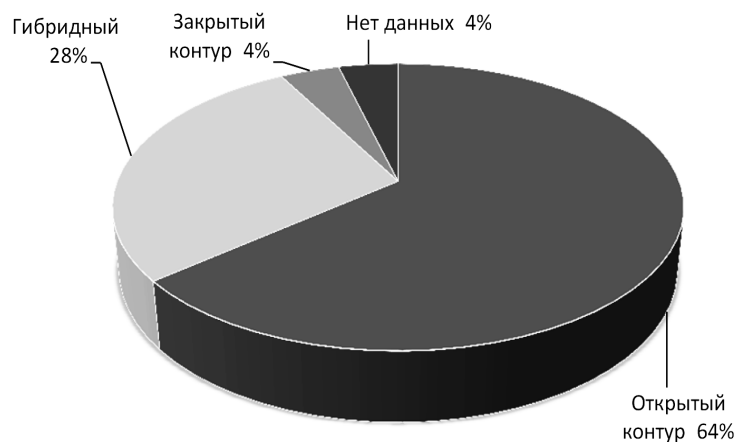


Рис. 6. Распределение типов скрубберных систем для проектируемых и модернизируемых судов

Количество судов, использующих LNG в качестве топлива, увеличивается, как показано на рис. 7, и все большее количество инфраструктурных проектов планируются или предлагаются вдоль основных судоходных путей, поскольку природный газ коммерчески привлекателен и доступен во всем мире в количествах, способных удовлетворить спрос на топливо в ближайшие десятилетия.

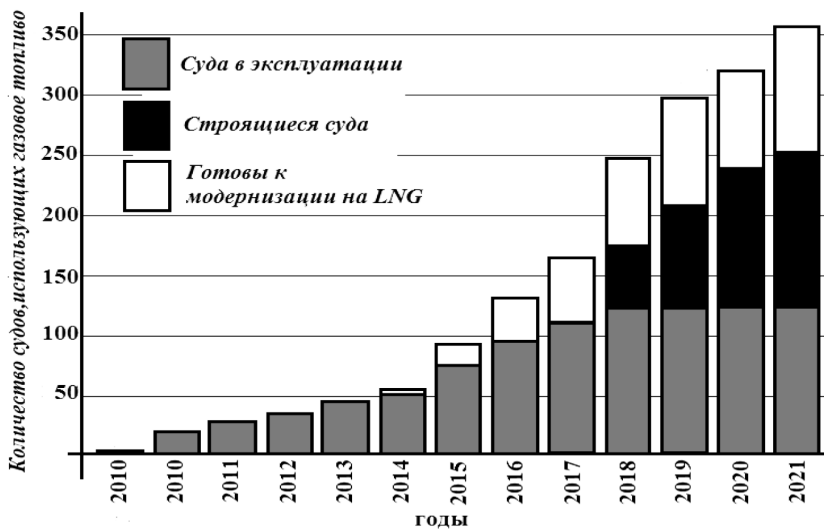


Рис. 7. Динамика роста количества судов, использующих газообразное топливо

Ожидается, что число судов различного типа, использующих LNG в качестве топлива (рис. 8), будет увеличиваться особенно интенсивно в североамериканских и северных европейских водах в соответствии с существующими или предстоящими требованиями к NO_x . Можно предполагать, что потенциальное увеличение цен на совместимое топливо относительно газообразного топлива побудит многих судовладельцев инвестировать в LNG. Альтернативные виды топлива, такие как метанол и биотопливо, смогут обслуживать небольшую долю рынка в краткосрочной перспективе [14], став альтернативой в некоторых местных районах, где предложение соответ-

ствует схемам торговли для судов. В будущем водород в качестве топлива с технологией топливных элементов в сочетании с батареями является новой альтернативой, особенно для малых судов, работающих на фиксированных маршрутах с обеспеченным энергоснабжением.

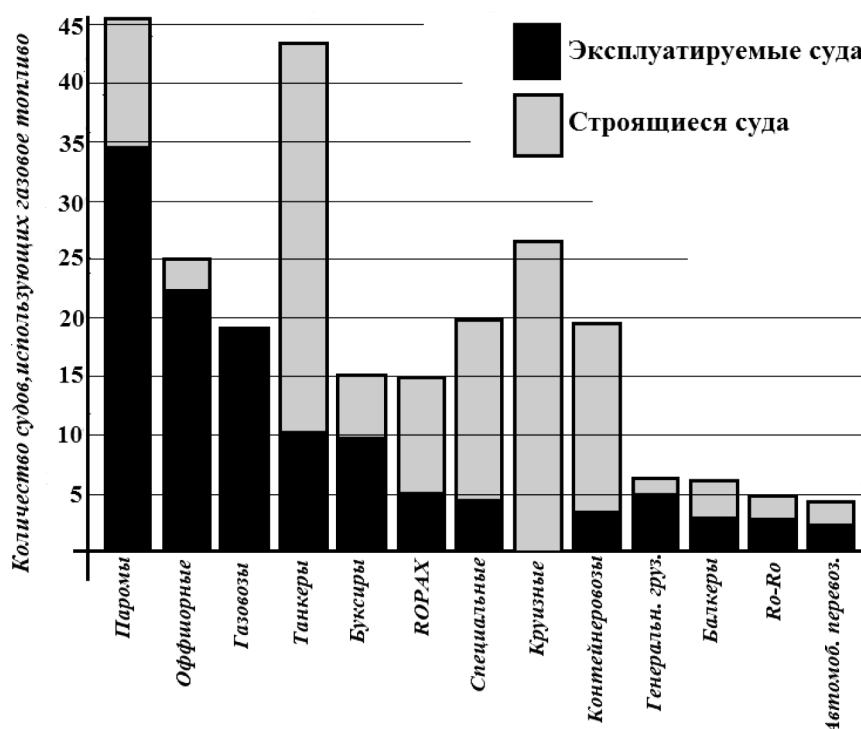


Рис. 8. Количество некоторых типов судов, работающих на LNG

Заключение (Conclusion)

При выборе способа соответствия новым требованиям ИМО по ограничению эмиссии серы в основном операторы судов сталкиваются с альтернативой выбора между использованием соответствующих видов топлива с содержанием серы менее 0,5 %, установкой скрубберной системы и продолжением использования высокосернистых тяжелых топлив или перевода энергетической установки на сжиженный природный газ [15].

Проведенный анализ эффективности различных способов соответствия судовых энергетических установок новым требованиям, демонстрируя главные тенденции, тем не менее не может претендовать на универсальность. Результаты анализа находятся в тесной зависимости от перспектив формирования рыночных цен на различные виды топлив и дальнейшего ужесточения экологических требований к вредным выбросам с отработавшими газами, предъявляемых к энергетическим установкам судов, точное прогнозирование которых не представляется возможным. В этой связи предпочтение выбора может, в некоторой мере, быть трансформировано с учетом возможной динамики этих факторов.

Результаты проведенного анализа свидетельствуют о следующем.

1. Выбор оптимального решения по вопросу соответствия новым требованиям ИМО по ограничению эмиссии серы с 2020 г. в каждом конкретном случае связан с разносторонним рассмотрением многофакторных аспектов проблемы и должен производиться с учетом влияния на другие параметры экологической безопасности судовых энергетических установок, среди которых выбросы парниковых газов и NO_x .

2. Скрубберные системы с разомкнутым контуром, безусловно, являются наиболее популярными в настоящее время благодаря их относительной простоте и сравнительно низкой стоимости, особенно для дооснащения существующих судов. Однако применимость этих систем не распространяется на районы, в которых введены ограничения на сброс промывочной воды скруббера.

В таких случаях может потребоваться установка гибридного скруббера, что существенно увеличит затраты на модернизацию судна и эксплуатационные расходы.

3. Целесообразность того или иного варианта способа соответствия существенно зависит от типа и размеров судна. Так, срок окупаемости скрубберных систем сокращается с увеличением мощности судовой энергетической установки, поэтому установка скруббера представляется наиболее целесообразной для крупных судов с высоким расходом топлива. В то же время при выборе способа соответствия для небольших судов перевод на LNG может быть более привлекательным решением, чем установка скрубберных систем.

4. Для судов, которые могут осуществлять плавание в зонах SECA или вблизи прибрежных районов, где часто введены ограничения на сброс промывочной воды скруббера, инвестирование в LNG может быть более подходящим решением, учитывая долгосрочную перспективу. Одновременно необходимо принимать во внимание возможность того, что в 2020 г. HSFO не будет легкодоступным во всех портах, что может сказаться на окупаемости проекта модернизации некоторых судов с установкой скрубберных систем.

5. Можно предположить, что потенциальное увеличение цен на совместимое топливо относительно газообразного топлива заставит многих судовладельцев инвестировать в LNG. Эта возможность вызывает постоянное увеличение количества судов, использующих LNG в качестве топлива.

6. Альтернативные виды топлива, такие как метанол и биотопливо, смогут обслуживать большую долю рынка в краткосрочной перспективе, а водород в качестве топлива с технологией топливных элементов в сочетании с батареями является новым альтернативным решением.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. 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.

2. 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.

3. 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.

4. Новиков Е. А. Определение серы в нефтепродуктах. Обзор аналитических методов / Е. А. Новиков // Мир нефтепродуктов. Вестник нефтяных компаний. — 2008. — № 1. — С. 28–33.

5. Новиков Е. А. Определение серы в нефтепродуктах. Обзор аналитических методов / Е. А. Новиков // Там же. — 2008. — № 3. — С. 27–32.

6. Новиков Е. А. Определение серы в нефтепродуктах. Обзор аналитических методов / Е. А. Новиков // Там же — 2008. — № 4. — С. 20–29.

7. Новиков Е. А. Определение серы в нефтепродуктах. Обзор аналитических методов / Е. А. Новиков // Там же. — 2008. — № 5. — С. 26–33.

8. 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.

9. 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.

10. 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.

11. SECA Assessment: Impacts of 2015 SECA marine fuel sulphur limits. First drawings from European experiences. — Delft: CE Delft, 2016. — 45 p.

12. Panasiuk I. The assessment algorithm of technological feasibility of SOx scrubber installation / I. Panasiuk, S. Lebedevas, J. Čerka // *Transport*. — 2018. — Vol. 33. — No. 1. — Pp. 197–207. DOI: 10.3846/16484142.2016.1152298.
13. Solakivi T. How shipowners have adapted to sulphur regulations—Evidence from Finnish seaborne trade / T. Solakivi, S. Laari, T. Kiiski, J. Töyli, L. Ojala // *Case Studies on Transport Policy*. — 2019. — Vol. 7. — Is. 2. — Pp. 338–345. DOI: 10.1016/j.cstp.2019.03.010.
14. Van T. C. Global impacts of recent IMO regulations on marine fuel oil refining processes and ship emissions / T. C. Van, J. Ramirez, T. Rainey, Z. Ristovski, R. J. Brown // *Transportation Research Part D: Transport and Environment*. — 2019. — Vol. 70. — Pp. 123–134. DOI: 10.1016/j.trd.2019.04.001.
15. Латухов С.В. Технологии обеспечения экологической безопасности судоходства: монография / С. В. Латухов [и др.]; под ред. д-ра географ. наук, проф. С. В. Латухова. — СПб.: Изд-во МАНЭБ, 2019. — 156 с.

REFERENCES

1. 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 admiral S.O. Makarova* 9.3 (2017): 581–596. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-3-581-596.
2. 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 admiral S. O. Makarova* 11.1 (2019): 130–145. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-1-130-145.
3. 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 admiral S. O. Makarova* 3(31) (2015): 103–112. DOI: 10.21821/2309-5180-2015-7-3-103-112.
4. Novikov, E. A. “Opredelenie sery v nefteproduktakh. Obzor analiticheskikh metodov.” *Mir nefteproduktov. Vestnik neftyanykh kompanii* 1 (2008): 28–33.
5. 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.
6. Novikov, E. A. “Opredelenie sery v nefteproduktakh. Obzor analiticheskikh metodov (Metody poopredele-niyu sery v nefteproduktakh pri pomoshchi rentgenovskogo izlucheniya) (Prodolzhenie. Nachalo v № 1, 2008g.)” *Mir nefteproduktov. Vestnik neftyanykh kompanii* 4 (2008): 20–29.
7. Novikov, E. A. “Opredelenie sery v nefteproduktakh. Obzor analiticheskikh metodov (Metody atom-noemissionnoi spektrometrii s induktivno svyazannoi plazmoi (AES-ISP).” *Mir nefteproduktov. Vestnik neftyanykh kompanii* 5 (2008): 26–33.
8. *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.
9. 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.
10. 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.
11. *SECA Assessment: Impacts of 2015 SECA marine fuel sulphur limits. First drawings from European experiences*. Delft: CE Delft, 2016.
12. Panasiuk, Irina, Sergejus Lebedevas, and Jonas Čerka. “The assessment algorithm of technological feasibility of SOx scrubber installation.” *Transport* 33.1 (2018): 197–207. DOI: 10.3846/16484142.2016.1152298
13. Solakivi, Tomi, Sini Laari, Tuomas Kiiski, Juuso Töyli, and Lauri Ojala. “How shipowners have adapted to sulphur regulations—Evidence from Finnish seaborne trade.” *Case Studies on Transport Policy* 7.2 (2019): 338–345. DOI: 10.1016/j.cstp.2019.03.010
14. Van, Thuy Chu, Jerome Ramirez, Thomas Rainey, Zoran Ristovski, and Richard J. Brown. “Global impacts of recent IMO regulations on marine fuel oil refining processes and ship emissions.” *Transportation Research Part D: Transport and Environment* 70 (2019): 123–134. DOI: 10.1016/j.trd.2019.04.001
15. Latukhov, S. V., O. V. Solyakov, V. A. Nikitin, V. N. Okunev, S. V. Titov, V. V. Yakunchikov, I. M. Dantsevich, A. A. Romanenko, and N. V. Pershin. *Ecological safety technologies for shipping: monograph*. Edited by S. V. Latukhov. SPb.: MANEB Publishing House, 2019.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

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

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

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

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

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

Статья поступила в редакцию 3 июля 2019 г.

Received: July 3, 2019.