

DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-4-793-803

ANALYSIS OF THE METHODS FOR REDUCING THE SULPHUR CONTENTS IN THE EXHAUST GASES OF SHIP'S ENGINES

P. A. Pyae

Saint-Petersburg State Marine Technical University,
St. Petersburg, Russian Federation

In 2020, the International Maritime Organization (IMO) plans to introduce a new environmental standard, called IMO Tier III. According to the future norm, the maximum permissible sulfur concentration in the exhaust gases of ship's engines for the whole world will be 0.5%, and for the emission control areas - 0.1%. There will be difficulties in sea transportation to implement this norm, as heavy fuel is used in transport vessels for the works of power plants today, and such fuel does not meet the IMO Tier 3 requirement. This problem is acute for oil tankers, because they are fueled is spent not only for traffic, but also for heating the transported cargo - approximately in equal proportions. The paper suggests ways to solve the problem with fuel for ships, especially for tankers, in order to meet the requirements of IMO Tier 3. No method is absolutely preferable. To achieve the goal set in this paper, a review and analysis of all the existing methods of solving the problem is carried out. Comparison of different types of fuel as an alternative for use on ships is performed. The use of traditional fuels with the use of additional equipment (scrubbers) is analyzed. Presented are the prospects of using a two-stage waste heat boiler, which provides a reduction in fuel consumption of up to 7% in oil tankers. Options are subject to analysis on environmental and economic indicators in order to find the best way to solve the problem presented.

Keywords: International Maritime Organization (IMO), IMO Tier3, fuel for marine power plants, scrubber, marine gas engines, auxiliary boiler plant, two-staged exhaust gas boiler.

For citation:

Pyae, Phyo Aung. "Analysis of the methods for reducing the sulphur contents in the exhaust gases of ship's engines." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 10.4 (2018): 793–803. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-4-793-803.

УДК 629.12.03.001.63

АНАЛИЗ СПОСОБОВ СНИЖЕНИЯ СОДЕРЖАНИЯ СОЕДИНЕНИЙ СЕРЫ В ВЫПУСКНЫХ ГАЗАХ СУДОВЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

П.А. Пьяе

Санкт-Петербургский государственный морской технический университет,
Санкт-Петербург, Российская Федерация

В 2020 г. Международная морская организация (ИМО) планирует ввести в действие новую экологическую норму, именуемую ИМО Tier III. Согласно будущей норме, максимально допустимая концентрация серы в отработанных газах судовых двигателей для всего мира будет составлять 0,5%, а для районов контроля выбросов — 0,1 %. В морских перевозках возникнут трудности для внедрения этой нормы, так как в сегодняшнее время в транспортных судах для работы СЭУ широко используется тяжелое топливо мазут, которое не обеспечивает требование ИМО Tier III. Данная проблема особенно актуальна для нефтеналивных судов, поскольку на них топливо расходуется не только для движения, но и для подогрева перевозимого груза (приблизительно в равной пропорции). В работе предлагаются способы решения проблемы с топливом для судов, особенно для танкеров, с целью обеспечения требованиям ИМО Tier III. Ни один способ не является абсолютно предпочтительным. Для достижения цели, поставленной в данной работе, производится обзор и анализ всех существующих способов решения проблемы. Выполнено сравнение различных видов топлива в качестве альтернативы для использования на судах. Анализируется использование традиционных топлив с применением дополнительного оборудования (скрубберы). Рассмотрены перспективы применения двухступенчатого утилизационного котла, обеспечивающего снижение расхода топлива до 7 % на нефтеналивных судах. Варианты подлежат анализу по экологическим и экономическим показателями с целью поиска оптимального способа решения представленной задачи.

Ключевые слова: Международная морская организация (IMO), IMO Tier III, топливо для судовых энергетических установок, скруббер, судовые установки на газовом топливе, вспомогательная котельная установка, двухступенчатый утилизационный котел.

Для цитирования:

Пьяе П. А. Анализ способов снижения содержания соединений серы в выпускных газах судовых двигателей / П. А. Пьяе // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2018. — Т. 10. — № 4. — С. 793–803. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-4-793-803.

Введение (Introduction)

Судовые энергетические установки (СЭУ) работают как на тяжелом топливе (мазут), так и на легком (дизельном) топливе и при этом загрязняют атмосферу, выбрасывая отработавшие газы, содержащие окислы серы SO_x, азота NO_x, углерода CO₂ и твердые частицы. Международная морская организация (IMO) регламентирует правила для предотвращения загрязнения окружающей среды с судов, устанавливая все более строгие экологические требования к СЭУ [1].

На рис. 1 представлено требование к содержанию серы в топливе. Как видно из этого рисунка, в 2020 г. вступит в силу новый экологический норматив, именуемый IMO Tier III, согласно которому количество серы в топливе судовых двигателей 1 не должно превышать 0,5 % для открытого моря и 0,1 % для специальных районов контроля выбросов 2 [2] – [3].

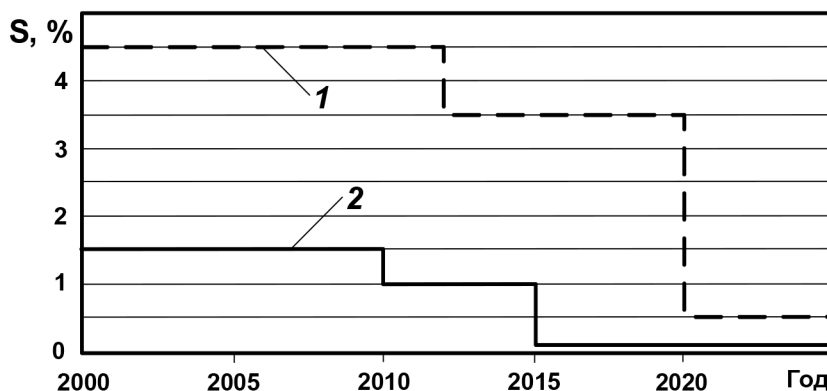


Рис. 1. Ограничения IMO содержания серы в топливе

В настоящее время на морских транспортных судах используется тяжелое топливо — мазут (М-40, М-100) из-за его низкой цены. Количество серы в таком топливе составляет около 3,5 % [4]. Очевидно, что существующая система работы СЭУ не удовлетворяет требованиям IMO Tier III. Особенно актуальна эта проблема для танкеров, расходующих за рейс вдвое большее количество топлива вследствие работы вспомогательных котлов, обеспечивающих подогрев перевозимого груза — тяжелых нефтепродуктов и парафинистой нефти. Необходимо выполнить анализ методов для приведения экологичности судовых энергетических установок в соответствие с требованиями стандарта IMO Tier III. Таким образом, задачей данной статьи является:

- 1) обзор способов снижения содержания серы в отработанных газах судовых энергетических установок с ДВС;
- 2) сравнительный анализ характеристик способов и разработка методики выбора оптимального варианта с целью его соответствия перспективным экологическим и экономическим требованиям.

Методы и материалы (Methods and Materials)

В настоящее время в технической литературе рассматриваются следующие основные способы снижения содержания серы в отработавших газах СЭУ:

1. Использование традиционных видов топлива и применение дополнительного оборудования (скруббер) для нейтрализации и очистки отработанных газов.

2. Использование альтернативных видов топлива (метанол, диметилэфир, водотопливная эмульсия, марингазойл, пропан и бутан, природный газ), соответствующих стандарту IMO Tier III.

3. Применение двухступенчатых котлов, позволяющих снизить расход топлива на танкерах приблизительно вдвое. Меньше сжигается топлива, меньше выпускных газов и меньше серы поступает в окружающую среду.

Следует отметить, что ни один из вышеуказанных способов не является абсолютно предпочтительным. У каждого из них есть свои недостатки и достоинства. Необходимо выполнить сравнительный анализ каждого способа и сделать выбор оптимального варианта для модернизации СЭУ в соответствии с требованиями IMO Tier III.

Результаты (Results)

1. Система нейтрализации отработанных газов с использованием скруббера.

Используется очистительная технология для продуктов сжигания высокосернистого топлива для уменьшения выбросов окислов серы в атмосферу. Разработаны скрубберы для очистки выхлопных газов от серы и диоксидов азота. Скрубберы позволяют уменьшать SOx до 90 %, NOx до 10 % и твердые частицы до 60 – 90 % от исходного содержания в выхлопных газах [5]. На судах распространено использование мокрых скрубберов, в которых для нейтрализации отработанных газов в качестве очищающей среды применяются либо морская вода, либо пресная с добавлением раствора щелочи (NaOH) [6]. На рис. 2 представлена принципиальная схема работы скруббера.

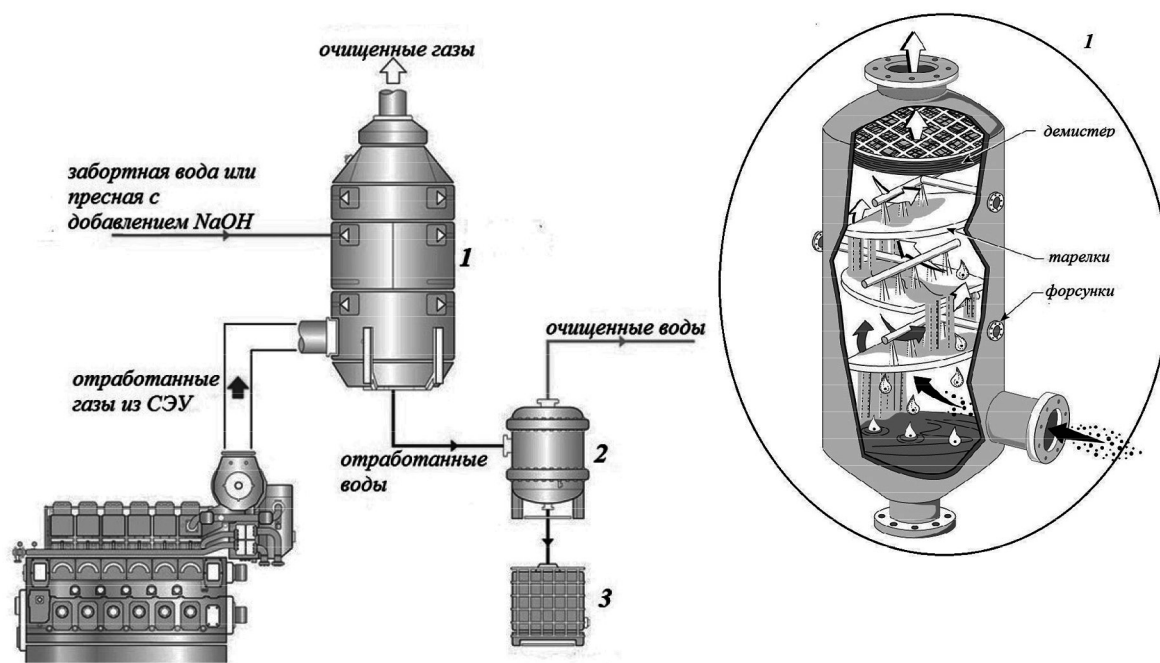


Рис. 2. Принципиальная схема работы скруббера:

1 — корпус очистки газов; 2 — блок очистки отработанных вод; 3 — шламовый танк

Система очистки отработанных газов из СЭУ выполняется в корпусе скруббера 1, который обычно состоит из следующих основных элементов: форсунки для распыления воды в корпусе скруббера, дырчатые тарелки для образования пены на этих поверхностях, демистер для отделения жидкости от уходящих газов на выходе скруббера. Выхлопные газы из СЭУ входят через входной трубопровод в нижнюю часть скруббера. В корпусе скруббера газы промываются очищающей водой. Очищающая вода под давлением подается в корпус скруббера. Форсунки, установленные в корпусе скруббера, обеспечивают хорошее распыление воды. Капли очищающей воды и газы

смешиваются, попадая далее на дырчатые тарелки. На этих тарелках смеси преобразуются в пену и одновременно происходит процесс отделения вредных выбросов газа в соответствии с химической реакцией. Через дырчатые тарелки очищенные газы поднимаются вверх и уходят в атмосферу через демистер, размещенный в верхней части скруббера. На демистере жидкости отделяются от газов и в атмосферу уходят только сухие чистые газы. Отработанные воды с шламом собираются в нижней части скруббера и затем отводятся из его корпуса, направляясь в блок очистки 2, где шлам отделяется от отработанных вод. Шлам сохраняется в танке 3, а очищенные воды циркулируют для повторного использования.

В зависимости от уровня щелочности воды в районах эксплуатации судов используют различные системы нейтрализации отработавших газов [7], а именно: скруббер с замкнутым циклом на пресной воде и дополнительном раствором NaOH, скруббер с открытым циклом на морской воде, скруббер с гибридным циклом.

При применении дополнительных систем СЭУ для нейтрализации отработавших газов с использованием скрубберов можно использовать традиционный дешевый высокосернистый мазут для работы СЭУ. В этом случае инфраструктура бункеровки судов не нуждается в изменении, однако большой вес и объем скруббера, необходимость цистерны для сбора и хранения результатов очистки, а также необходимость выброса отработанного раствора солей за борт являются главными недостатками применения системы нейтрализации отработавших газов с использованием скрубберов [5].

2. Использование в качестве моторного топлива альтернативных видов топлива, соответствующих стандарту IMO Tier III.

Метанол.

Использование в качестве моторного топлива метанола CH_3OH отвечает экологическим требованиям IMO Tier III. Метанол потенциально дешевле традиционных видов топлива, а также более распространён. Однако при этом имеются некоторые недостатки. Основным недостатком использования метанола в качестве моторного топлива СЭУ является его более низкая температура вспышки (8°C) и более короткое время сгорания. Это не только связано с его взрывоопасностью [8], но и способствует увеличению содержания NOx. Кроме того, до сих пор использование метанола для работы СЭУ находится только на стадии испытаний. В мировой практике отсутствует опыт эксплуатации судов, работающих на метаноле.

Диметилэфир (ДМЭ).

Основным достоинством применения ДМЭ $\text{C}_2\text{H}_6\text{O}$ в качестве топлива СЭУ является его высокая экологичность [9]. Однако теплота сгорания ДМЭ ниже аналогичного показателя традиционного дизельного топлива в 1,6 раза и такое топливо потенциально 1,5 раза дороже традиционного дизельного топлива. Из-за низкой температуры вспышки, применение данного топлива возможно только в виде добавок. Максимально возможная концентрация ДМЭ в дизельном топливе по этой причине составляет 0,7 %.

Водотопливная эмульсия (ВТЭ).

В результате проведенных опытов использования ВТЭ в двигателях внутреннего сгорания различного назначения и котельных установках определен состав трехкомпонентной водотопливной эмульсии, отвечающий следующим требованиям: дизельное топливо — 37,5 %, мазут Ф-5 — 32,5 %, вода — 30 %. Использование ВТЭ обеспечивает экономию топлива около 3 % при значительном улучшении экологических характеристик продуктов сгорания и снижении нагарообразования [10]. Однако следует отметить, что при применении ВТЭ в качестве моторного топлива не обеспечивается соблюдение требований IMO Tier III. При использовании ВТЭ содержание серы в отработанных газах будет находиться на уровне чистого дизельного топлива [11].

Малосернистое дизельное топливо (марингазойль — MGO).

Основным достоинством применения MGO в качестве топлива СЭУ является отсутствие требования в дополнительных системах СЭУ. Не требуется также модернизация систем существующей энергетической установки. Недостаток применения MGO в качестве топлива СЭУ состо-

ит в том, что только некоторые нефтеперерабатывающие заводы Российской Федерации способны производить данный вид топлива [12] и, следовательно, его стоимость чрезвычайно высока по сравнению с другими видами топлива — приблизительно 850 – 900 долл. за тонну [13].

Пропан и бутан.

Проводя многочисленные испытания, следует отметить, что применение такого газового топлива, как метан, пропан и бутан в качестве моторного топлива для работы СЭУ обеспечивает соответствие требованиям IMO Tier III [14]. Пропан и бутан — это углеводородные газы и их можно найти в сочетании с другими углеводородами. Газы пропан (C_3H_8) и бутан (C_4H_{10}) получаются при переработке природного газа и нефти. Пропан и бутан — это побочные продукты сжижения природного газа и почти 60 % от всего количества пропана получается в результате переработки необработанного природного газа. Остальные 40 % извлекают при перегонке сырой нефти.

Основными достоинствами применения пропана и бутана в качестве моторного топлива СЭУ являются их компоненты, которые обеспечивают не только уменьшение вредных выбросов выхлопных газов, но и увеличенную смазку и срок службы двигателя; они могут быть сжижены при умеренном давлении и нормальной температуре [15], [16] (температура кипения пропана — $-42\text{ }^{\circ}\text{C}$ и бутана — $-1\text{ }^{\circ}\text{C}$). Пропан и бутан легко хранятся в емкостях под умеренным давлением благодаря своей простоте и безопасности, при этом упрощается бункеровка судов и облегчается хранение топлива в запасных танках.

Существенными недостатками применения пропана и бутана в качестве топлива СЭУ являются: высокая стоимость по сравнению с другими альтернативными топливами (приблизительно 700 – 800 долл./т); топливную систему и систему хранения таких газов необходимо модернизировать, и следовательно, возрастает стоимость переоборудования систем СЭУ; в настоящее время снабжение пропаном и бутаном в портах не распространено.

Сжиженный природный газ (СПГ).

Применение СПГ для работы СЭУ является одним из перспективных способов снижения вредных выбросов в соответствии с требованиями IMO Tier III. Использование СПГ в качестве моторного топлива СЭУ позволяет полностью исключить выбросы серы, сократить выбросы оксидов азота на 90 % и снизить выбросы диоксида углерода на 30 %, а также сократить выброс твердых частиц. Основным компонентом СПГ является метан (CH_4). Фирмы-производители двигателей MANB&W, Wärtsilä изготавливают двухтопливные судовые двигатели, в состав моторного топлива которых входят СПГ (90 – 99 %) и дизельное топливо (1 – 10 %) как запальное [17]. Дополнительным достоинством при переводе СЭУ на СПГ является его меньшая стоимость по сравнению с другими альтернативными видами топлива — около 400 долл./т [13]. Кроме того, использование СПГ в России обеспечит получение еще большей прибыли, так как внутренняя цена на газ в России в 3,2 раза меньше, чем его цена на Европейском рынке. Однако при этом имеются и явные недостатки: необходимость создания более сложной инфраструктуры, обеспечивающей снабжение потребителей, — отсутствие развитой системы бункеровки судов СПГ и высокие требования законодательства Российской Федерации к местам расположения емкостей хранения СПГ.

При переводе СЭУ на газовое топливо необходимо модернизировать систему хранения запаса топлива и снабжения. На рис. 3 представлена схема снабжения газовым топливом для работы СЭУ на судне. На судне требуются специальные запасные танки хранения СПГ [18], обеспечивающие мощную тепловую защиту от воздействия внешней среды. В таких запасных танках СПГ наливается и сохраняется в виде криогенной жидкости при температуре $-162\text{ }^{\circ}\text{C}$. При этом следует отметить, что такие танки не могут полностью защитить повышению температуры СПГ из-за воздействия внешней среды. Следовательно, криогенные жидкости СПГ от 0,15 % до 0,18 % от вместимости танков в сутки преобразуются в газообразную фазу [19]. Образующиеся газы постоянно откачиваются и далее через компрессор низкого давления (0,4 – 0,7 МПа) направляются к газовым двигателям. В случае, если потребляемый расход газа для двигателей становится меньше, чем расход образующегося в танках газа, то необходимо сохранить избыточные газы в резервуарах высо-

кого давления (25 МПа). Значит, на судне нужно установить резервуары с необходимым объемом. В противном случае, если количества образующегося в танках газа недостаточно для обеспечения расхода газовых двигателей, на судне требуется регазификатор для преобразования СПГ в газообразную фазу. Кроме того, СПГ взрывоопасен, поэтому при его использовании, во избежание протечки, требуется надежная процедура передачи топлива к СЭУ. По этой причине в топливной системе необходимо использовать трубопроводы с двойной стеной. Таким образом, поскольку система использования и хранения СПГ является сложной, стоимость переоборудования судовых силовых установок на СПГ значительно возрастает.

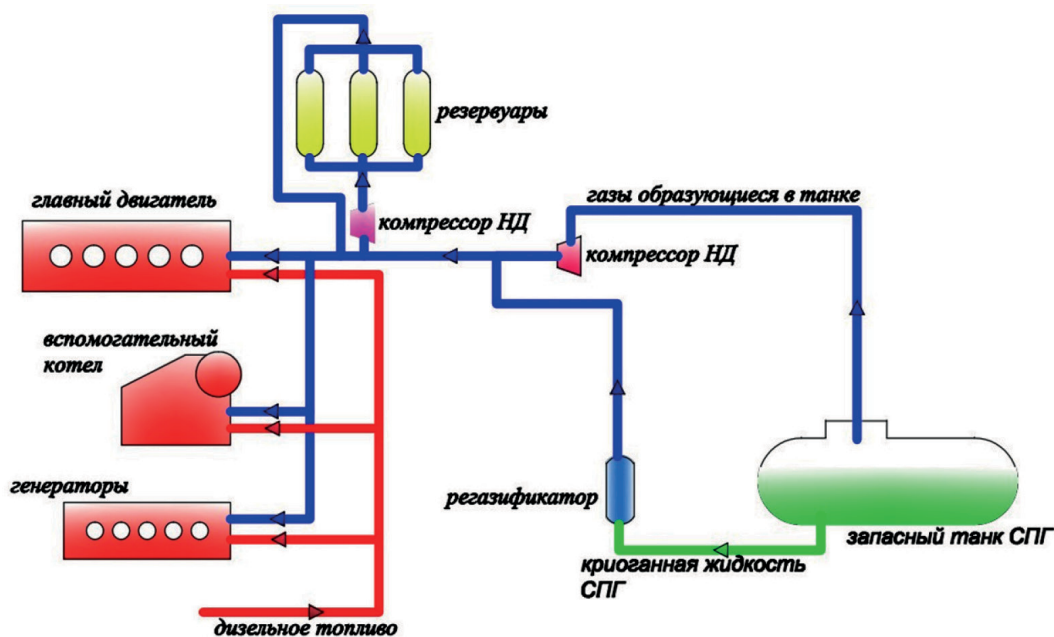


Рис. 3. Схема снабжения газовым топливом для работы СЭУ

В табл. 1 представлены сравнительные характеристики СПГ и стандартного дизельного топлива. Как видно из таблицы, исходя из умножения низшей теплоты сгорания и плотности, можно отметить, что за единицу измерения энергии (джоуль), затрачиваемой двигателем в танках запаса топлива, необходимо иметь СПГ большего объема, чем традиционного дизельного топлива. Значит, при переводе СЭУ на газовое топливо СПГ из традиционного дизельного суммарный объем танков запаса топлива увеличивается приблизительно в 1,8 раза. Так как определяющим фактором является грузовместимость, эффективность перевозок грузов будет снижена.

Таблица 1

Характеристики сжиженного природного газа и дизельного топлива

Сравнительные характеристики	СПГ (в жидком состоянии)	ДТ
Низшая теплота сгорания, кДж/кг	50300	42700
Плотность, кг/м ³	400	863

Тем не менее, по мнению ряда специалистов, при подготовке к введению стандарта ИМО Tier III в 2020 г. из ранее указанных альтернативных видов топлива применение СПГ в качестве моторного является наиболее перспективным видом топлива.

3. Применение двухступенчатых утилизационных котлов.

Для судов, особенно для танкеров, если у них продолжается использование тяжелого топлива с применением скрубберов, следует изменить схему вспомогательной котельной установки (ВКУ). В настоящее время применяется объединенная схема ВКУ с использованием традицион-

ного одноступенчатого утилизационного котла. В связи с тем, что при применении объединенной схемы ВКУ вспомогательный и утилизационный котлы работают на общий сепаратор, невозможно глубоко утилизировать теплоту выхлопных газов из СЭУ [20]. Поэтому выхлопные газы с высокой температурой уходят в атмосферу. Возможно, полезно использовать эту теплоту выхлопных газов при переводе объединенной схемы ВКУ танкера на раздельную [21].

Особенностью раздельной схемы ВКУ является работа вспомогательного и утилизационного котла на свои сепараторы. Кроме того, для обеспечения разнотемпературных тепловых потребителей паром танкера, необходимо модернизировать традиционный одноступенчатый утилизационный котел на двухступенчатый [22], обеспечивающий в максимальной степени глубокую утилизацию теплоты выхлопных газов и получение в три раза больше пара от утилизационных устройств. Вследствие получения от двухступенчатого утилизационного котла большого количества пара с разными параметрами, в предлагаемой в статье раздельной схеме вспомогательный котел, работающий на топливе, должен работать только в некоторых режимах эксплуатации танкера (при перевозке тяжелых нефтепродуктов зимой в северных районах).

Основными достоинствами применения на танкерах раздельной схемы ВКУ с использованием двухступенчатого котла являются: способность обеспечить выполнение разнообразных требований к параметрам пара [21] (пар с температурой 180 °С для подогрева тяжелого топлива и пар с температурой 145 °С для обогрева нефтегруза, цистерн, балласта, парового и водяного отопления, кондиционированного воздуха и бытовых потребителей); возможность осуществить глубокую и структурированную утилизацию теплоты выхлопных газов; возможность уменьшить расход топлива и снизить выбросы в окружающую среду углекислого газа, так как вспомогательный котел исключается из работы; обеспечить получение экономического и экологического эффекта.

В табл. 2 представлены результаты сравнения экологической эффективности, получаемой от системы утилизации для танкера-прототипа «Московский проспект» при его эксплуатации на линии 2×6000 миль [23]: в первой графе приведены результаты эффективности, получаемой от объединенной схемы ВКУ с традиционным утилизационным котлом; во второй графе — результаты раздельной схемы ВКУ с ДУК. В анализе сравнения не учитывается эффективность снижения NO_x и SO_x, поскольку при сжигании топлива во вспомогательных котлах окислы азота не образуются и окислы серы не выбрасываются в окружающую среду из-за применения скрубберов на выходе газохода.

Таблица 2

Эффективность от системы утилизации

Сравнительные получаемых эффективности	Объединенная схема ВКУ	Раздельная схема ВКУ
Экономия топлива за рейс, т	68	143
Снижение выбросов CO ₂ , т	198	450
Снижение выделения теплоты в окружающую среду, МДж	2895	6572

Итак, очевидно, что повышение экологической эффективности танкера при применении раздельной схемы ВКУ зависит от перевода традиционного одноступенчатого утилизационного котла на двухступенчатый. К сожалению, на мировом рынке отсутствуют фирмы, производящие такие котлы. Разработка типоразмерного ряда ДУК становится инновационной задачей для обеспечения мировой потребности танкерного флота. Для решения данной задачи требуется:

1. Разработка универсальной модели проектирования ДУК с параметризацией в функции влияющих факторов.
2. Определение характеристик типоразмерного ряда ДУК для удовлетворения потребностей широкого спектра судов танкерного флота.
3. Предложение отечественной промышленности ограниченной номенклатуры типоразмеров ДУК для обеспечения отечественных танкеров.

Несмотря на то, что идея применения ДУК и разработка их типоразмерного ряда являются совсем новыми, эту задачу можно решить. Так, в работах [24], [25] представлены методики и перспективы по решению данной задачи. Разработана универсальная модель проектирования ДУК с параметризацией в функции влияющих факторов [26]. По показателям эффективности и экономичности ДУК разрабатываются в виде типоразмерного ряда с определенной градацией, связанной со статистическим анализом потребителей — танкеров [27]. На основе результатов исследований представлены результаты экологической и экономической эффективности от разработки типоразмерного ряда ДУК [28].

Очевидно, что цели экологических требований ИМО таковы, что мазут и традиционное дизельное топливо постепенно будут изъяты из использования. Несмотря на то, что применение ДУК не способно уменьшить количество серы в выхлопных газах из СЭУ, можно снизить расход тяжелого топлива, используемого для работы вспомогательного котла. При этом следует отметить, что на танкерах, вследствие их работы, расход топлива для работы ВК приблизительно равен расходу для главного двигателя и следовательно, чем меньше сжигается топлива, тем меньше выпускных газов и меньше серы поступает в окружающую среду.

Выводы (Conclusion)

1. Все рассмотренные в работе способы имеют свои достоинства и недостатки. Каждый способ требует разработки и внедрения инновационных методов. Специалисты, с одной стороны, пытаются разработать более компактные скрубберы [29] для нейтрализации отработанных газов, а с другой — решить проблему бункеровки [30] – [31] и хранения на судне СПГ. В настоящее время стоимость газового топлива почти в 2 раза ниже стоимости традиционного органического топлива.

2. При применении СПГ требуются дополнительные инвестиции для перехода СЭУ на газовое топливо. В случае, если СЭУ продолжает работать на традиционном топливе с использованием системы нейтрализации отработанных газов, необходимо установить скрубберы, при этом строительная стоимость также возрастает. Тем не менее согласно анализу [13], в настоящее время количество судов, на которых применяются скрубберы, почти в три раза больше количества судов, использующих сжиженное газовое топливо. Причем большинство из последних — это суда-газовозы, перевозящие СПГ.

3. Особенностью танкеров для перевозки тяжелых нефтепродуктов является необходимость установки вспомогательных котлов для выработки пара. В их газовыхлопной тракте необходимо встраивать второй скруббер, несмотря на то, что с установкой первого уже существуют проблемы. Применение двухступенчатых утилизационных котлов позволяет уменьшить скруббер вспомогательного котла, что облегчит его размещение в газоходе вспомогательного котла.

4. Применение скрубберов в системах отвода газов от главных двигателей является дополнительным сопротивлением, что может сказаться на мощности двигателей. Однако возможно, что впрыск воды способствует снижению гидравлического сопротивления, и установка скруббера не окажет влияния на характеристики двигателя. Кроме того, при необходимости на выходе скруббера устанавливается вентилятор во избежание падения противодавления двигателей.

5. На основе статистического анализа приведено обоснование параметров и выполнена разработка конструкции типоразмерного ряда ДУК для использования на отечественных судах и поставок на мировой рынок, включающих шесть типоразмеров [32]. Эта проблема заслуживает отдельного рассмотрения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Freestone D. International union for the conservation of Nature / D. Freestone, K. M. Gjerde, R. Rayfuse, D. V. Zwaag //The International Journal of Marine and Coastal Law. — 2008. Vol. 23. — Is. 2. — Pp. 359–363. DOI: 10.1163/092735208X295882.*

2. Environmental product guide. Environmental technologies.—Vaasa:Wärtsilä,2017. — 66 p.
3. Руководство по средствам защиты окружающей среды компании Wärtsilä. — Вааса: Wärtsilä, 2012.— 61 p.
4. Демидова Н. П. Основные показатели судового топлива и их основные эксплуатационные свойства / Н. П. Демидова, А. А. Марченко, О. А. Онищенко // Вестник Камчатского государственного технического университета. — 2015. — № 32. — С. 6–11. DOI: 10.17217/2079-0333-2015-32-6-11.
5. Руководство и изделие скруббер (газоочиститель). — Finland: Wärtsilä, 2013. — 98 с.
6. Zhou J. Experiment and prediction studies of marine exhaust gas SO₂ and particle removal based on NaOH solution with a U-type scrubber / J. Zhou, S. Zhou, Y. Zhu // Industrial and engineering chemistry research. — 2017. — Vol. 56. — Is. 43. — Pp. 12376–12384. DOI: 10.1021/acs.iecr.7b02397.
7. SOx scrubber technology. — Finland: Wärtsilä, 2017.— 8 p.
8. Methanol as an alternative fuel for vessels. Public final report. — Netherland:Maritime Knowledge Centre, 2017.— 24 p.
9. Li G. Dimethyl Ether (DME) - a new alternative fuel for diesel vehicle / G. Li // Advanced materials research journal. — 2010. — Vol. 156–157. — Pp. 1014–1018. DOI:10.4028/www.scientific.net/AMR.156-157.1014.
10. Malahov A. Efficiency improvement of ships operation by water-fuel emulsion using / A. Malahov, R. Gudilko, A. Palagin, I. Maslov // Восточно-европейский журнал передовых технологий. — 2016. — Т. 3. — № 8 (81). — С. 48–53. DOI:10.15587/1729-4061.2016.72544.
11. Шагеев М. Ф. Использование водотопливной эмульсии как метод энергосбережения и повышения экологической безопасности энергетических предприятий / М. Ф. Шагеев, Э. М. Хайриева // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока.— 2011. — № 1. — С. 174–176.
12. Kuimov D. N. Low-sulfur fuel and oil production / D. N. Kuimov, M. S. Minkin, A. D. Lukyanov // The collection of the papers of material science forum. — 2016. — Vol. 870. — Pp. 671–676. DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.870.671.
13. Eelco D. B. Scrubber – An economic and ecological assessment / D. B. Eelco, H. Maarten. — Delft: NABU, 2015. — 45 p.
14. LPG for marine engines. The marine alternative fuel. — France: WLPGA, 2017. — 142 p.
15. Guide to LPG Use in waterborne vessels.— France: WLPGA, 2017. — 34 p.
16. Sveinbjorn K. A Feasibility Study on Propane and Butane as Marine Fuel: master thesis/K. Sveinbjorn. — Sweden.: Chalmers University of Technology, 2011.— 48 p.
17. Кристен К. IMOTier 3: газовые и двухтопливные двигатели — экологически чистое и эффективное решение (материалы конгресса CIMAC 2013) / К. Кристен, Д. Бранд // Двигателестроение. — 2013. — № 4. — С. 42–56.
18. Han S. Structural risk analysis of an NO96 membrane-type liquefied natural gas carrier in Baltic ice operation / S. Han, J. Y. Lee, Y. I. Park, J. Che // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part M: Journal of Engineering for the Maritime Environment. — 2008. — Vol. 222. — Is. 4. — Pp. 179–194. DOI: 10.1243/14750902JEME118.
19. Bahadori A. Thermal insulation handbook for the oil, gas and petrochemical industries: Monograph / A. Bahadori. — Amsterdam: Elsevier, 2014. — 394 p. DOI: 10.1016/B978-0-12-800010-6.00004-6.
20. Мьо Ч. Т. Анализ способов повышения эффективности вспомогательных котельных установок нефтеналивных судов: дис. ... канд. техн. наук; специальность: 05.08.05 «Судовые энергетические установки и их элементы» / Ч. Т. Мьо. — СПб.: СПбГМТУ, 2015. — 158 с.
21. Пьяе П. А. Разработка типоразмерного ряда двухступенчатых паровых котлов / П. А. Пьяе, Г. А. Архипов, А. Г. Даниловский // Сборник материалов пятой Всероссийской межотраслевой научно-технической конференции. — СПб.: Изд-во СПбГМТУ, 2016. — С. 221–224.
22. Пьяе П. А. Создание ряда двухступенчатых утилизационных котлов для морских судов / П. А. Пьяе // Сборник материалов VII межвузовской научно-практической конференции аспирантов, студентов и курсантов. — СПб.: Изд-во ГУМРФ им. адм. С. О. Макарова, 2016. — С. 180–183.
23. Даниловский А. Г. Анализ методов повышения эффективности судовой вспомогательной котельной установки/ А. Г. Даниловский, А. А. Иванченко, Чжо ТуМьо // Журнал университета водных коммуникаций. — 2012. — № 3. — С. 87–94.
24. Yordanov V. Prospects of application of two-stage exhaust gas boiler in dual pressure ship's auxiliary steam generation system / V. Yordanov, A. G. Danilovsky, P. A. Pyae//Collection of the works of thirteen international conference on marine science and technologies «Black Sea 2016». — Bulgaria: BSHC, 2016.— Pp. 215–220.

25. Архипов Г. А. Повышение тепловой экономичности судовой вспомогательной котельной установки / Г. А. Архипов, А. Г. Даниловский, П. А. Пьяе // Сборник научных трудов профессорско-преподавательского состава Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — СПб.: Изд-во ГУМРФ им. адм. С. О. Макарова, 2016. — С. 21–30.
26. Пьяе П. А. Структура модели проектирования двухступенчатого утилизационного котла / П. А. Пьяе, А. Г. Даниловский // Сборник материалов Всероссийского межотраслевого научно-технического форума. — СПб.: Изд-во СПбГМТУ, 2017. — С. 264–268.
27. Пьяе П. А. Методика оптимизации типоразмерного ряда двухступенчатых утилизационных котлов / П. А. Пьяе, А. Г. Даниловский // Сборник материалов Всероссийского межотраслевого научно-технического форума. — СПб.: Изд-во СПбГМТУ, 2017. — С. 260–264.
28. Пьяе П. А. Оптимизация типоразмерного ряда двухступенчатых утилизационных котлов / П. А. Пьяе // Сборник материалов седьмой Всероссийской межотраслевой научно-технической конференции. — СПб.: Изд-во СПбГМТУ, 2018. — С. 335–339.
29. Wärtsilä I-SOx scrubber system. — Finland: Wärtsilä, 2017. — 4 p.
30. Федеральное агентство морского и речного транспорта (Росморречфлот) [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://www.morflot.ru/> (дата обращения: 01.05.2018).
31. Луцкевич А. М. СПГ-бункеровщик родом из Петербурга / А. М. Луцкевич, А. Б. Крестьянцев // Портный. Портный сервис. — 2017. — № 1 (25). — С. 74–77.
32. Даниловский А. Г. Типоразмерный ряд двухступенчатых утилизационных котлов / А. Г. Даниловский, И. В. Атанасов, П. П. Аунг // Морские интеллектуальные технологии. — 2017. — Т. 3. — № (37). — С. 54–59.

REFERENCES

1. Freestone, D., K. M. Gjerde, R. Rayfuse, and D. V. Zwaag. "International union for the conservation of Nature." *The International Journal of Marine and Coastal Law* 23.2 (2008): 359–363. DOI: 10.1163/092735208X295882
2. *Environmental product guide. Environmental technologies*. Vaasa: Wärtsilä, 2017.
3. *Rukovodstvo po sredstvam zashchity okruzhayushchei sredy kompanii Wärtsilä*. Vaasa: Wärtsilä, 2012.
4. Demidova, N. P., A. A. Marchenko, and O. A. Onishchenko. "Basic indexes of ship fuel and their basic operating properties." *Bulletin of Kamchatka state technical university* 32 (2015): 6–11.
5. *Rukovodstvo na izdelie skrubber (gazoochistitel')*. Finland: Wärtsilä, 2013.
6. Zhou, J., S. Zhou, and Y. Zhu. "Experiment and prediction studies of marine exhaust gas SO₂ and particle removal based on NaOH solution with a U-type scrubber." *Industrial and engineering chemistry research* 56.43 (2017): 12376–12384. DOI: 10.1021/acs.iecr.7b02397.
7. *SOx scrubber technology*. Finland: Wärtsilä, 2017.
8. *Methanol as an alternative fuel for vessels. Public final report*. Netherland: Maritime Knowledge Centre, 2017.
9. Li, G. "Dimethyl Ether (DME) - a new alternative fuel for diesel vehicle." *Advanced materials research journal* 156–157 (2010): 1014–1018. DOI:10.4028/www.scientific.net/AMR.156-157.1014.
10. Malahov, Aleksey, R. Gudilko, A. Palagin, and Igor Maslov. "Efficiency improvement of ships operation by water-fuel emulsion using." *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies* 3.8(81): 48–53. DOI: 10.15587/1729-4061.2016.72544
11. Shageev, V. F., and E. M. Hairieva. "Use water-fuel emulsion as a method energy-saving and increases of ecological safety of the power factories." *Nauchnye problemy transporta Sibiri i Dal'nego Vostoka* 1 (2011): 174–176.
12. Kuimov, D. N., M. S. Minkin, and A. D. Lukyanov. "Low-sulfur fuel and oil production." *The collection of the papers of material science forum* 870 (2016): 671–676. DOI:10.4028/www.scientific.net/MSF.870.671.
13. Eelco, D. B., and H. Maarten. *Scrubber – An economic and ecological assessment*. Accessment. Delft: NABU, 2015.
14. *LPG for marine engines. The marine alternative fuel*. France: WLPGA, 2017.
15. *Guide to LPG Use in waterborne vessels*. France: WLPGA, 2017.
16. Sveinbjorn, K. A. *Feasibility Study on Propane and Butane as Marine Fuel. Master thesis*. Sweden: Chalmers University of Technology, 2011.
17. Christen, C., and D. Brand. "IMO TIER 3: Gas and dual fuel engines as a clean and efficient solution (CIMAC 2013)." *Dvigatellestroenie* 4 (2013): 42–56.

18. Han, S., J. Y. Lee, Y. I. Park, and J. Che. "Structural risk analysis of an NO96 membrane-type liquefied natural gas carrier in Baltic ice operation." *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part M: Journal of Engineering for the Maritime Environment* 222.4 (2008): 179–194. DOI: 10.1243/14750902JEME118.
19. Bahadori, A. *Thermal insulation handbook for the oil, gas and petrochemical industries*. Monograph. Amsterdam: Elsevier, 2014.
20. Myo, K. T. *Analiz sposobov povysheniya effektivnosti vspomogatel'nykh kotel'nykh ustanovok neftenalivnykh sudov*. PhD diss. SPb.: SPbGMTU, 2015.
21. Pyae, P. A., G. A. Arkhipov, and A. G. Danilovsky. "Razrabotka tiporazmernogo ryada dvukhstupenchatykh parovykh kotlov." *Sbornik materialov pyatoi Vserossiiskoi mezhotraslevoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii*. SPb.: Izd-vo SPbGMTU, 2016. 221–224.
22. Pyae, P. A. "Sozdanie ryada dvukhstupenchatykh utilizatsionnykh kotlov dlya morskikh sudov." *Sbornik materialov VII mezhvuzoskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii aspirantov, studentov i kursantov*. SPb.: Izd-vo GUMRF im. adm. S. O. Makarova, 2016. 180–183.
23. Danilovsky, A. G., A. A. Ivanchenko, and K. T. Myo. "Analysis of the methods of increasing the efficiency of the ship auxiliary boiler installation." *Zhurnal universiteta vodnykh kommunikatsii* 3 (2012): 87–94.
24. Yordanov, V., A. G. Danilovsky, and P. A. Pyae. "Prospects of application of two-stage exhaust gas boiler in dual pressure ship's auxiliary steam generation system." *Collection of the works of thirteen international conference on marine science and technologies «Black Sea 2016»*. Bulgaria: BSHC, 2016. 215–220.
25. Arkhipov, G. A., A. G. Danilovsky, and P. A. Pyae. "Improving heat economy ship auxiliary boiler plant." *Sbornik nauchnykh trudov professorsko-prepodavatel'skogo sostava gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova*. SPb.: Izd-vo GUMRF im. adm. S.O. Makarova, 2016. 21–30.
26. Pyae, P. A., and A. G. Danilovsky. "Struktura modeli proektirovaniya dvukhstupenchatogo utilizatsionnogo kotla." *Sbornik materialov Vserossiiskogo mezhotraslevogo nauchno-tekhnicheskogo foruma*. SPb.: Izd-vo SPbGMTU, 2017. 264–268.
27. Pyae, P. A., and A. G. Danilovsky. "Metodika optimizatsii tiporazmernogo ryada dvukhstupenchatykh utilizatsionnykh kotlov." *Sbornik materialov Vserossiiskogo mezhotraslevogo nauchno-tekhnicheskogo foruma*. SPb.: Izd-vo SPbGMTU, 2017. 260–264.
28. Pyae, P. A. "Optimizatsiya tiporazmernogo ryada dvukhstupenchatykh utilizatsionnykh kotlov." *Sbornik materialov sed'moi Vserossiiskoi mezhotraslevoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii*. SPb.: Izd-vo SPbGMTU, 2018. 335–339.
29. *Wärtsilä I-SOx scrubber system*. Finland: Wärtsilä, 2017.
30. Federal'noe agentstvo morskogo i rechnogo transporta (Rosmorrechflot). Web. 1 May 2018 <<http://www.morflot.ru/>>.
31. Lutskevich, A. M., and A. B. Krest'yantsev. "SPG – bunkerovshchik rodом iz Peterburga." *Portn'yus. Portovyi servis* 1(25) (2017): 74–77.
32. Danilovsky, A., I. Atanasov, and P. Aung. "Size-range of two-step recycling boilers." *Marineintellectualtechnologies* 3.3(37)(2017): 54–59.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Пьяе Пхио Аунг — аспирант
Научный руководитель:
Даниловский Алексей Глебович —
доктор технических наук, доцент
Санкт-Петербургский государственный морской
технический университет
190008, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
ул. Лоцманская, 3
e-mail: 023.pyaephyo@gmail.com

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Pyae, Phyo Aung — Postgraduate
Supervisor:
Danilovsky, Alexey G. —
Dr. of Technical Sciences, associate professor
Saint-Petersburg State Marine Technical
University
3 Lotsmanskaja Str., St. Petersburg, 190008,
Russian Federation
e-mail: 023.pyaephyo@gmail.com

Статья поступила в редакцию 20 июня 2018 г.
Received: June 20, 2018.