

TECHNICAL SUPPORT FOR SHIP POWER PLANTS COMPLIANCE WITH THE NEW REQUIREMENTS FOR NITROGEN OXIDE EMISSIONS IN 2021

G. E. Zhivljuk, A. P. Petrov

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

It is expected that since 2021, at the initiative of the International Maritime organization, the control zones for nitrogen oxide emissions in the exhaust gases of ship power plants will be expanded to cover the regions of the Baltic and North Seas. In such circumstances, shipowners operating in these regions, at the stages of modernization and construction of new ships inevitably face the problem of choosing a way to meet the new requirements. The following variants of compliance are considered: selective catalytic reduction of nitrogen oxides; application of exhaust gas recirculation system; use of alternative fuels, as well as a number of technical solutions related to the direct impact on the working process of the engine, aimed at reducing the emission of nitrogen oxides. It is noted that the consideration of various technologies to meet the new requirements and analysis of their advantages and disadvantages will create prerequisites for the choice of the concept and the way to achieve the requirements of the environmental standard TIER III, used in emission control zones. Attention is drawn to the fact that in order to achieve the requirements of the TIER III standard, first of all, the systems of selective catalytic recovery and exhaust gas recirculation are considered as the most proven technologies. In conclusion, it is noted that ensuring the environmental requirements of the TIER III standard for a wide range of operating modes of the ship's power plant is a complex task, the solution of which can be achieved during the engine design by the simultaneous implementation of various technologies to reduce NOx emissions. The increased demand for TIER III engines can be expected to provide additional motivation for manufacturers to find and implement new design solutions aimed at reducing the content of nitrogen oxides in exhaust gases, as well as to refine and make more extensive use of already known methods to combat NOx emissions.

Keywords: marine power plant, environmental safety, IMO requirements, NOx emission, control zones, compliance methods, selective catalytic reduction, exhaust gas recirculation, alternative fuels, choice of option.

For citation:

Zhivljuk, Grigorij E., and Aleksandr P. Petrov. "Technical support for ship power plants compliance with the new requirements for nitrogen oxide emissions in 2021." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 12.1 (2020): 122–138. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-1-122-138.

УДК 621.43.074

ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДЛЯ СООТВЕТСТВИЯ СУДОВЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК НОВЫМ ТРЕБОВАНИЯМ 2021 г. ПО ВЫБРОСАМ ОКСИДОВ АЗОТА

Г. Е. Живлюк, А. П. Петров

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

Отмечается, что с 2021 г., по инициативе Международной морской организации, зоны контроля эмиссии оксидов азота в отработавших газах судовых энергетических установок будут расширены и распространятся на регионы Балтийского и Северного морей. В таких условиях судовладельцы, осуществляющие деятельность в указанных регионах, на этапах модернизации и постройки новых судов неизбежно столкнутся с проблемой выбора способа соответствия новым требованиям. В качестве вариантов соответствия в данном исследовании рассмотрены: селективное каталитическое восстановление оксидов азота; применение системы рециркуляции отработавших газов; использование альтернативных видов топлива, а также ряд технических решений, связанных с непосредственным воздействием на рабочий

процесс двигателя, направленных на уменьшение эмиссии оксидов азота. Отмечается, что рассмотрение различных технологий соответствия новым требованиям и анализ их преимуществ и недостатков позволит создать предпосылки для выбора концепции и способа достижения требования экологического стандарта TIER III, применяемого в зонах контроля эмиссии. Обращается внимание на то, что для достижения требований стандарта TIER III, в первую очередь, рассматриваются системы селективного каталитического восстановления и рециркуляции отработавших газов как наиболее апробированные технологии. В заключение отмечается, что обеспечение экологических требований стандарта TIER III для широкого диапазона эксплуатационных режимов работы судовой энергетической установки представляется комплексной задачей, решение которой может достигаться в конструкции двигателя одно-временной реализацией различных технологий сокращения выбросов NO_x . Можно ожидать, что повышенный спрос на двигатели, соответствующие стандарту TIER III, создаст дополнительную мотивацию заводам-изготовителям к поиску и внедрению новых конструкторских решений, направленных на понижение содержания в отработавших газах оксидов азота, а также доработку и более широкое использование уже известных способов борьбы с эмиссией NO_x .

Ключевые слова: судовая энергетическая установка, экологическая безопасность, требования ИМО, эмиссия NO_x , зоны контроля, способы соответствия, селективное каталитическое восстановление, рециркуляция отработавших газов, альтернативные виды топлива, выбор варианта.

Для цитирования:

Живлюк Г. Е. Техническое обеспечение для соответствия судовых энергетических установок новым требованиям 2021 г. по выбросам оксидов азота / Г. Е. Живлюк, А. П. Петров // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2020. — Т. 12. — № 1. — С. 122–138. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-1-122-138.

Введение (Introduction)

В Международной судоходной отрасли происходит постоянное ужесточение нормативно-правовой базы на ограничения выбросов в атмосферу. Основным генератором экологически вредных веществ является энергетическая установка судна. В результате сгорания углеводородного топлива в тепловом двигателе образуется ряд веществ, оказывающих негативное влияние на состояние воздушного бассейна. К таким веществам относятся: парниковые газы, являющиеся естественными и полными продуктами окисления, оксиды азота (NO_x), несгоревшие углеводороды, оксиды серы (при наличии серы в топливе), твердые частицы, сажа. Наибольшую часть эмиссии вредных веществ с отработавшими газами поршневого ДВС составляют оксиды азота.

В целях минимизации вредного воздействия отработавших газов производится регламентирование выбросов путем введения экологических стандартов. Регулирование на водном транспорте введено Международной морской организацией (International Maritime Organization — IMO) начиная с 2000 г. Эмиссия вредных веществ с отработавшими газами ограничивается Прил. VI «Международной конвенции по предотвращению загрязнения с судов» (International Convention for the Prevention of Pollution from Ships — MARPOL 73/78), принятым в первой редакции в 1997 г. Одновременно IMO был разработан и принят «Технический кодекс по выбросам оксидов азота судовых дизелей». В соответствии с Правилom 13 Прил. VI^{1,2} все суда валовой вместимостью более 400 т постройки после 1 января 2000 г. должны проходить освидетельствование и получать Международное свидетельство по предотвращению загрязнения атмосферы (International Air Pollution Prevention Certificate — IAPP) сроком на 5 лет. Дополнительно каждый судовый дизель мощностью более 130 кВт должен пройти освидетельствование и получить на 5 лет Международное свидетельство по предотвращению загрязнения атмосферы (Engine International Air Pollution Prevention Certificate — EIAPP). Значительно более жесткие требования по ограничению выбросов оксида азота действуют с 2016 г. для судов, которые были заложены после 1 января 2016 г. и работают в зоне контроля выбросов в Северной Америке и США (Карибский бассейн). Такие суда должны соответствовать предельным уровням выбросов по стандарту Tier III. Это означает, что

¹ Nitrogen Oxides (NO_x) – Regulation 13. [Электронный ресурс]. Режим доступа: [http://www.imo.org/en/OurWork/Environment/PollutionPrevention/AirPollution/Pages/Nitrogen-oxides-\(NOx\)-%E2%80%93Regulation-13.aspx](http://www.imo.org/en/OurWork/Environment/PollutionPrevention/AirPollution/Pages/Nitrogen-oxides-(NOx)-%E2%80%93Regulation-13.aspx).

² New requirements for NO_x emissions for vessels engaged in Chinese domestic trade. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.dnvgl.com/news/new-requirements-for-nox-emissions-for-vessels-engaged-in-chinese-domestic-trade-125086>.

судовые энергетические установки должны выбрасывать на 80 % меньше NO_x , чем установки, соответствующие требованиям 2000 г.¹ Ожидается, что с 2021 г. аналогичные ограничения будут распространяться также на Северное и Балтийское море для судов, которые будут заложены после 1 января 2021 г. [1]². В связи с ранее изложенным судовладельцы должны на этапе планирования своей дальнейшей деятельности и нового строительства тщательно продумать будущую эксплуатацию своих судов. Необходимо понимать значение различных технологических решений для сокращения выбросов NO_x и способы выполнения требований, поскольку они могут явиться основными факторами успеха любого нового плана судостроения.

Целью статьи являются анализ технологий для достижения судами требований уровня Tier III по NO_x и оценка эффективности принимаемых технических решений.

Для проведения дальнейшего анализа необходимо предварительно рассмотреть основные нормативно-правовые аспекты технического регулирования сокращения выбросов оксидов азота, на основании которых будет выполнена оценка эффективности существующих технологий.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Нормативно-правовые акты технического регулирования. Главным нормативным документом, регламентирующим выбросы основных загрязнителей воздуха, содержащихся в отработавших газах судов, включая оксиды серы (SO_x) и оксиды азота, является принятое в 1997 г. Прил. VI к MARPOL 73/78 (привязка к стандарту Tier I, см. рис. 1) — первый этап. На втором этапе, начиная с 2008 г., после пересмотра Прил. VI к МАРПОЛ, Международная морская организация приняла решение о введении дополнительных ограничений на выбросы NO_x . На этом этапе (уровень Tier II) предусматривалось сокращение выбросов NO_x примерно на 20 % по сравнению со значениями, полученными в соответствии с требованиями Tier I.

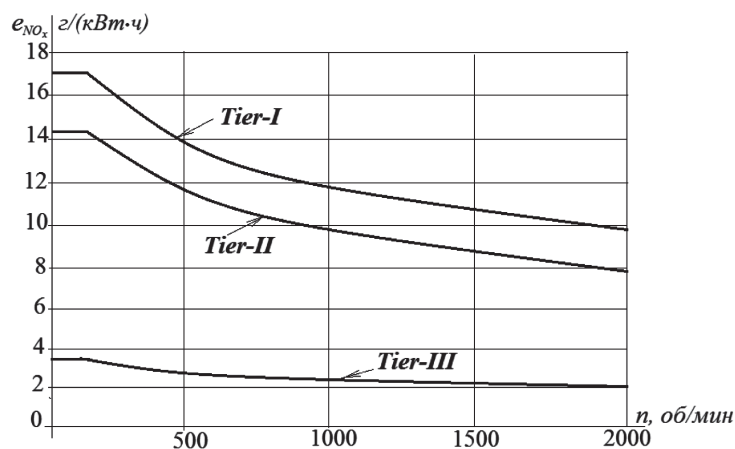


Рис. 1. Уровень выбросов основных загрязнителей воздуха стандартов различных уровней надежности

Дальнейшая регламентация снижения (порядка 80 %) выбросов NO_x (Tier-III) относится к определенной дате (1 января 2016 г.) закладки киля и области деятельности судна (зона контроля эмиссии оксидов азота (NO_x Emission Control Areas — NECA)). На третьем этапе были выявлены серьезные проблемы для производителей двигателей, операторов судов и сертификационных органов как с технической, так и с эксплуатационной точки зрения, поскольку достижение уровня Tier III без использования специальных технологий практически неосуществимо. В этой связи Морской комитет по охране окружающей среды (Maritime Environmental Protection Committee

¹ Shipping's impact on air quality. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.transportenvironment.org/what-we-do/shipping-and-environment/shipping%E2%80%99s-impact-air-quality>.

² Impact of a nitrogen emission control area (NECA) for ship traffic on the future air quality in the Baltic Sea region. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2017EGUGA..19.5500K/abstract/>.

(МЕРС)) ИМО опубликовал Резолюцию МЕРС.198 (62)¹ [1], [2] и Резолюцию с поправками ИМО (МЕРС.260 (68))^{2,3} [3] для сертификации селективного каталитического восстановления (Selective Catalytic Reduction (SCR)) как наиболее эффективного, не требующего изменения конструкции двигателя способа очистки отработавших газов от оксидов азота. В обеспечение единого понимания этих документов для большинства признанных организаций Международная ассоциация классификационных обществ (International Association of Classification Societies (IACS)) опубликовала в 2015 г. интерпретации этих руководящих принципов⁴ [4], [5].

Таким образом, под ограничения стандарта Tier III подпадают только те суда, которые были построены (дата закладки киля) после 1 января 2016 г. и работают на севере в американских и / или американских Карибских морях (зоны NECA). Ожидается, что с 1 января 2021 г. зона NECA будет распространяться на Северное и Балтийское море (рис. 2). При этом суда более поздней постройки, не предназначенные для работы в этих зонах, не подпадают под требования стандарта Tier III, но должны соответствовать ограничениям на выбросы стандарта Tier II, которые были приняты в 2011 г. Одновременно следует отметить, что Китай также работает над приложением для NECA и намерен направить предложения в ИМО до 2020 г. В настоящее время объем требований и региональное расширение для новых зон контроля все еще находятся в стадии обсуждения.

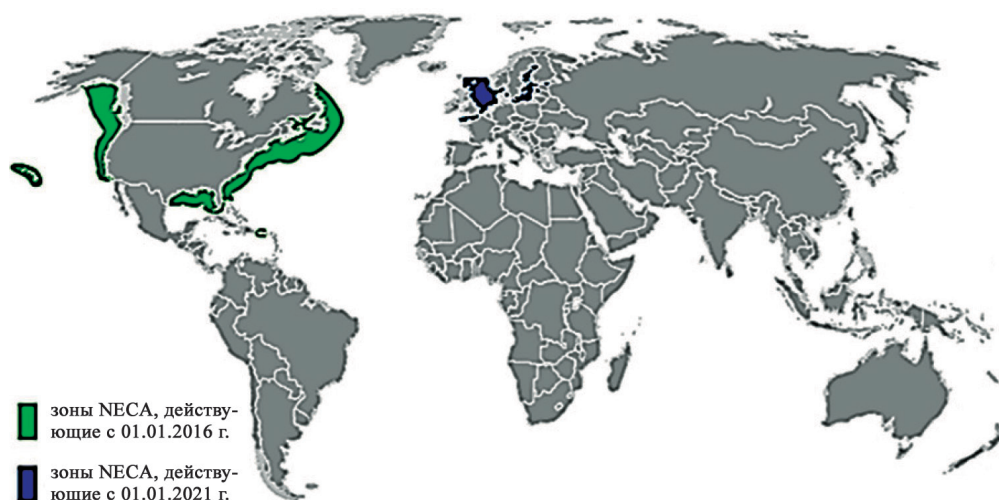


Рис. 2. Распределение зон контроля эмиссии NO_x (NECA)

Особенности применения стандарта Tier III. Техническое регулирование стандарта Tier III распространяется на следующие суда:

- с двигателями мощностью более 130 кВт;
- с датой закладки киля после 1 января 2016 г. при условии, что суда работают в зонах контроля эмиссии Северной Америки и / или Карибском бассейне;
- с датой закладки киля после 1 января 2021 г., если зона деятельности судов затрагивает бассейн Северного и Балтийского морей.

В случаях, если судно не используется в NECA, к нему применяется стандарт Tier-II.

Необходимо отметить, что ранее изложенное относится только к судам без флага США. Для судов под американским флагом все двигатели, установленные на борту, должны соответствовать

¹ Бюллетень № 14 изменений и дополнений к Конвенции МАРПОЛ 73/78 и резолюций Комитета ИМО по защите морской среды от загрязнения с судов. СПб: ЦНИИМФ, 2012. 192 с.

² НД 2-030101-025. Руководство по применению положений технического кодекса по контролю выбросов окислов азота из судовых дизельных двигателей. СПб.: Российский морской регистр судоходства, 2016. 126 с.

³ НД №2-030101-009. Руководство по техническому наблюдению за судами в эксплуатации. СПб.: Российский морской регистр судоходства, 2017. 313 с.

⁴ SECA Assessment: Impacts of 2015 SECA marine fuel sulphur limits. First drawing from European experiences – Delft: CE Delft, 2016. 45 p.

стандарту Tier III. Правительство США занимает позицию, согласно которой все двигатели (главные двигатели, вспомогательные двигатели, аварийный генератор и т. д.), установленные в соответствии с «Международной конвенцией по безопасности» (Safety of Life at Sea (SOLAS) [6] на борту судна постройки 2016 г. и позже, должны быть сертифицированы в соответствии с требованиями стандарта Tier III. При этом допускается ситуация, когда судно, построенное после 2016 г., имеет один или несколько двигателей, не сертифицированных по стандартам Tier III. В этих случаях владелец / оператор судна должен быть готов доказать, что эти двигатели не использовались и не будут использоваться в пределах NECA для Северной Америки и в Карибском море.

В общем случае, когда возникает необходимость замены двигателя в ходе модернизации судна постройки до 2016 г., работающего в зоне NECA, неидентичная замена двигателя должна соответствовать стандартам IMO Tier III. Однако существует ряд случаев, когда допустима замена двигателя моделью образца, аналогичного экологического уровня. К ним относятся следующие:

- подходящий новый двигатель, соответствующий требованиям стандарта Tier III, не является коммерчески доступным;
- для приведения подменного двигателя в соответствие стандарту Tier III необходима установка устройств для сокращения эмиссии NO_x , которые из-за своих габаритов не могут быть установлены в ограниченных пространствах на борту судна;
- установка дополнительного технологического оборудования вызовет значительное тепловыделение в машинном отделении, устранить воздействие которого будет невозможно;
- замена двигателя с технологическим оборудованием увеличит потребление энергии судовой электростанции сверх установленной мощности;
- конструктивные изменения, связанные с заменой, повлекут за собой ослабление структурной стабильности судна ниже приемлемого уровня;
- для реализации концепции SCR потребуются чрезмерная по конструктивным соображениям емкость хранения мочевины, разместить которую не представляется возможным;
- в случае использования SCR вес энергетической установки будет увеличен сверх допустимого;
- характеристики двигательной установки в результате замены двигателя не будут способны обеспечить сопоставимую маневренность или управляемость судна;
- некоторые другие случаи.

При возникновении рассмотренных ранее ситуаций отсутствия возможности замены двигателя судовладелец должен представить доказательства того, что двигатель, соответствующий стандарту Tier III, не может быть установлен, и должен сообщить конкретно, что этому препятствует. Судовладелец должен документировать поиск двигателей, соответствующих стандарту Tier III разных производителей, и объяснить, почему доступные самые близкие двигатели по размеру или характеристикам не подходят для судна. Документированное обоснование несоответствующей стандарту Tier III замены двигателя должно храниться с заменой сертификата EIAPP. В качестве аргументов, препятствующих установке Tier III совместимого двигателя, не должны рассматриваться гарантийный срок и ресурс двигателя, его стоимость и сроки поставки или производства.

Дополнительным стимулом к установке технологий, соответствующих стандарту IMO Tier III по NO_x , могут являться прямые финансовые преимущества, поскольку крупные порты предлагают значительные скидки в портовых сборах. Одним из часто используемых показателей интенсивности воздействия судоходства на окружающую среду является *экологический индекс судов* (Environmental Shipping Index (ESI-индекс)), используемый основными портами для расчета портовых сборов. С учетом того, что реализация судовой энергетической установкой уровня Tier III добавляет примерно пять баллов по шкале ESI по сравнению с Tier II, возможно получение дополнительных финансовых преимуществ в портовых сборах для разных портов.

Например, сокращения сборов для судов, работающие на уровне III, предоставляются следующими портами:

- Лос-Анджелес: 2500 долл. (ESI выше 50);
- Гамбург: 1500 евро (ESI выше 50);
- Роттердам — 20 % скидка на Tier III;
- Антверпен — 10 % (ESI выше, чем 31) и др.

Существуют и другие схемы стимулирования: Фонд NO_x для Норвегии, Финская инвестиционная помощь, Морская Сингапурская зеленая инициатива, схема стимулирования Шэньчжэнь, Финансирование инфраструктуры (Европейские порты) и т. д.

Проблемы модернизации судов до уровня Tier III. В связи с ожидаемым расширением зон NECA с 1 января 2021 г. возможно проявление определенных сложностей в применении технологий обеспечения требований стандарта Tier III для судов, рабочая зона которых ранее планировалась вне NECA. Модернизация энергетических установок таких судов, в соответствии с требованиями стандарта Tier III, может потребовать необходимость наличия дополнительного пространства машинного отделения под установку технологического оборудования, поэтому выполнить мероприятия по модернизации бывает крайне затруднительно. Немаловажной проблемой является также контроль и мониторинг системы, а главное, — тестирование оборудования на соответствие. Техническое регулирование требует выполнения тестирования соответствия по определенным программам испытаний, которые предусматривают проведение измерений на стационарных режимах в определенных точках нагрузки. Выполнение таких измерений параметров работы двигателя возможно только на испытательных стендах, а не на двигателе, установленном на борту судна.

Еще одним аспектом проблемы является изменение остаточной стоимости судов на вторичном рынке. Очевидно, суда, соответствующие требованиям стандарта Tier III, при перепродаже будут обладать более высокой стоимостью и окажутся более востребованными, чем суда, не соответствующие стандарту. Поскольку область деятельности новых владельцев судов, не соответствующих установленным требованиям, будет ограничена, спрос и стоимость таких судов тоже будут снижены или судовладельцы вынуждены будут выполнять модернизацию, направленную на соблюдение новых требований. Поэтому владельцы судов должны тщательно изучать технологии установки оборудования для соответствия требованиям Tier III на этапе строительства, даже если первоначально запланированная зона эксплуатации судна находится за пределами NECA.

Выбор вариантов соответствия. Для соблюдения ограничений на выбросы NO_x в соответствии со стандартом Tier III операторы судов могут выбирать различные варианты. Выбор варианта соответствия зависит от индивидуальной модели торговли, типа двигателя, скорости судна и других факторов. К доступным технологиям сокращения эмиссии NO_x, в первую очередь, следует отнести:

- селективное каталитическое восстановление (SCR);
- систему рециркуляции отработавших газов (Exhaust Gas Recirculation (EGR));
- использование альтернативных видов.

Кроме того, возможно использование других технологий достижения соответствия, таких как внутренние модификации двигателя, применение водо-топливной эмульсии (Fuel-Water Emulsion (FWE)), непосредственный впрыск воды в камеру сгорания (Direct Water Injection (DWI)), увлажнение всасываемого воздуха (Intake air Humidification and Humid air Motors (HAM)) и т. д.

Селективное каталитическое восстановление (SCR). Селективное каталитическое восстановление (SCR) является периферийной системой обработки отработавших газов, способной снизить выбросы NO_x более чем на 80 % на любом типе двигателя. SCR — это хорошо известное и хорошо себя зарекомендовавшее в автотранспортном приложении «дополнение» системы очистки отработавших газов¹. Система как таковая не требует изменений основной конструкции двигателя и, по существу, позволяет свободно выбирать любого производителя двигателя. Кон-

¹ Passenger Cars / Light and Medium Duty Vehicles May 2019. [Электронный ресурс]. — Режим доступа: https://www.continental-automotive.com/getattachment/8f2dedad-b510-4672-a005-3156f77d1f85/EMISSIONBOOKLET_2019.pdf.

цепция SCR (рис. 3) предполагает использование в системе выпуска каталитической установки (реактора), который производит восстановление оксидов азота посредством взаимодействия их с раствором мочевины распыленным в потоке отработавших газов в присутствии катализатора (оксиды металлов переменной валентности). Несмотря на кажущуюся простоту процессов, при использовании SCR могут возникнуть особые проблемы использования в тех случаях, когда системы поставляются не производителями оригинального оборудования. В этой связи в последнее время ведущие производители двигателей самостоятельно производят разработку и комплектование своей продукции системами SCR, управление которыми производится по оригинальным программам.

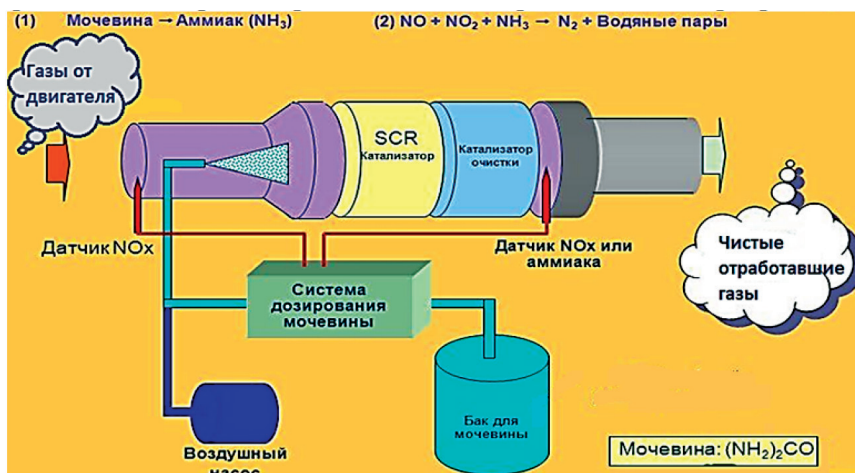


Рис. 3. Концепция селективного каталитического восстановления SCR

Эффективное протекание каталитической реакции восстановления оксидов азота в реакторе SCR требует определенного уровня температур отработавших газов, что делает проблематичным использование реактора на режимах малой нагрузки двигателя. Поэтому для двухтактных двигателей наиболее вероятным является расположение блока SCR в непосредственной близости от двигателя, перед турбинной частью турбокомпрессора, что позволяет расширить диапазон активного функционирования SCR. Таким образом, уместно рассмотреть системы SCR высокого и низкого давления. Основной принцип системы SCR высокого давления показан на рис. 4, а.

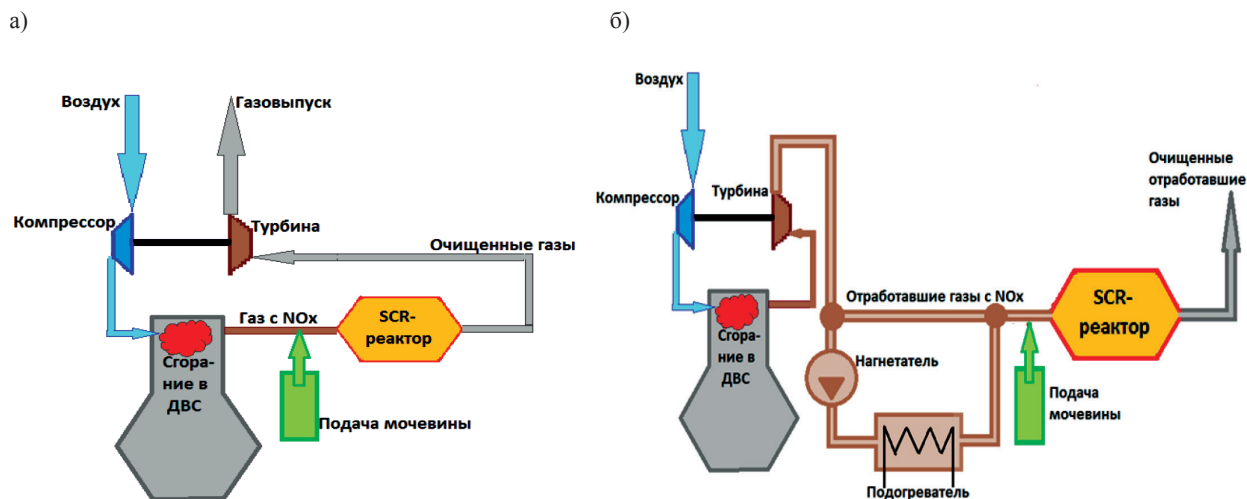


Рис. 4. Схемы систем SCR:
а — высокого давления; б — низкого давления

В системе SCR высокого давления (см. рис. 4, а) модуль реактора устанавливается перед турбиной турбокомпрессора и находится в зоне повышенного давления отработавших газов. Ввиду малого удельного объема газа, находящегося под давлением перед турбиной, система оказывается компактной, но требует усиления конструкции, способной выдержать развиваемое давление. Несмотря на то, что газ имеет достаточно высокую температуру (поскольку поступает в систему непосредственно из цилиндров двигателя), создание условий протекания каталитических реакций восстановления на режимах низких нагрузок остается проблематичным. Для работы системы необходима дополнительная электроэнергия обеспечения вспомогательных систем, что при суммировании с повышением противодавления на выпуске двигателя обуславливает неизбежность некоторого увеличения расхода топлива энергетической установкой. Такая система способна в особых случаях поддерживать работу главного двигателя на тяжелом топливе.

Альтернативным решением является система SCR низкого давления, схема которой представлена на рис. 4, б. В отличие от системы SCR высокого давления, модуль реактора SCR низкого давления устанавливается за турбиной, что конструктивно оказывается проще. Кроме того, избыточное давление в системе практически отсутствует, и к конструкции не предъявляются повышенные требования по прочности, при этом она имеет большие габариты. Тем не менее объем машинного отделения, занимаемый системой, может быть минимизирован за счет способности катализатора ослаблять шум системы газовыпуска. Каталитический блок может частично или полностью заменить глушитель, и сегодня комбинированные пакеты SCR и глушителя доступны для оптимизации занимаемого системой пространства.

Использование байпасного хода с подогревателем газа позволяет расширить мощностной диапазон использования каталитического восстановления NO_x несмотря на то, что температура отработавших газов при проходе через проточные части турбины понижается. Однако в случае необходимости применения подогревателя газа в системе низкого давления неизбежны дополнительные потери электроэнергии. Вне зависимости от выбранной конфигурации системы SCR, наиболее уязвимым элементом системы является каталитический модуль, который подлежит периодической замене. Срок службы и частота замены элементов катализатора в основном зависят от времени работы, качества топлива, типа катализатора и других факторов. Для обеспечения работы двигателя при засорении или разрушении блока катализатора в конструкции должна быть предусмотрена обводная магистраль отработавших газов, минуя систему SCR.

Расширение диапазона режимов работы двигателя с системой SCR остается важной проблемой. Ограничений в применении SCR не существует для непрерывного функционирования четырехтактных двигателей, работающих на винт с регулируемым шагом или для главного дизель-генератора при электродвижении судна. В таких случаях нагрузка двигателя выше 20 % и требуемая температура отработавших газов, равная 310–350 °С, может поддерживаться всеми возможными способами судном даже во время маневрирования. В отношении двухтактных двигателей, которые имеют механическую передачу на винт фиксированного шага, существуют некоторые проблемы с SCR. Главный двигатель таких судов должен работать при крайне низкой нагрузке, даже останавливаясь для реверса во время маневрирования. На таких режимах работы блок SCR для двухтактных двигателей должен быть отключен. Таким образом, очевидно, что для двухтактных двигателей имеется определенный потенциал для дальнейшего улучшения технологии SCR при низкой нагрузке двигателя или на маневровых режимах. При этом следует отметить, что переходные режимы двигателя выходят за рамки «Положения о контроле выбросов NO_x от морских дизельных двигателей». Это означает, что непродолжительные периоды работы двигателя, включая запуск двигателя и короткие периоды маневрирования, требующие реверса двигателя, не подпадают под нормативную базу Правила 13 Прил. VI к Конвенции МАРПОЛ.

При рассмотрении вопросов распределения пространства для систем SCR, необходимо прежде всего отметить, что требования стандарта Tier III применяются для новых судов, следовательно, дополнительное пространство должно выделяться еще на этапе проектирования. В настоящее время системы SCR установлены на более чем 300 судах, в большинстве случаев в ходе

модификации энергетических установок. В ходе модернизации энергетических установок судов, находящихся в эксплуатации в зонах NECA, возможно возникновении затруднений с размещением оборудования в машинном отделении. Так, если объем каталитического реактора SCR низкого давления составляет порядка 1,5–3 м³ на каждый МВт установленной мощности, то должно быть выделено достаточное пространство для подсистемы подготовки, подачи и дозирования мочевины, которое обычно составляет 2–6 м прямой выпускной трубы (в зависимости от рабочего объема двигателя) перед катализатором. Кроме того, необходимо наличие отдельного пространства для размещения бака (баков) хранения мочевины. Размер бака водного раствора мочевины (40 %) зависит от размера двигателя и от того, насколько часто используется SCR, а также как часто судно может брать мочевину на борт. Современные суда (оффшорные, RoPax, рыболовные суда) используют емкость для мочевины 30–100 м³, которая распределяется между одним-двумя танками. Общая мощность двигателя с SCR этих судов составляет 3–25 МВт, в результате чего емкость бака мочевины варьируется в пределах 4–10 м³ / МВт. Меньшие суда обычно работают локально и могут заполнять танки чаще при условии, что мочевина доступна в портах.

Как отмечалось ранее, системы SCR критичны к качеству используемого топлива. Принципиальным является то, что системы SCR могут быть использованы при работе двигателя на высокосернистом тяжелом топливе, если система очистки отработавших газов правильно спроектирована и поддерживается в работоспособном состоянии. Содержание серы в мазуте и, соответственно, концентрация SO_x в отработавших газах является критическим параметром при работе систем SCR. Следует избегать кристаллизации бисульфата аммония, происходящей при работе на низкой нагрузке. Для того чтобы предотвратить конденсацию бисульфата аммония на каталитических элементах, необходимо поддерживать температуру отработавших газов на достаточно высоком уровне. Конденсация способна оказать большое влияние на производительность системы SCR по снижению NO_x и будет вызывать повышенное противодавление (вследствие засорения каталитического модуля), которое, в конечном итоге, может привести к ухудшению работы двигателя. Исходя из этого, впрыск мочевины и температура газа в катализаторе должны контролироваться в целях минимизации этого риска.

Для минимизации первоначальных инвестиционных затрат следует также сократить пространство, необходимое для системы SCR (можно, например, на стадии проектирования предусмотреть такое решение, как работу двигателя в зонах NECA на режиме частичной нагрузки). Неполноформатные (уменьшенные) системы SCR и двойной рейтинг двигателя не упоминаются в руководящих правилах. Однако, если производитель двигателя демонстрирует достаточные доказательства того, что все требования нормы соблюдены, то такой подход может быть принят к исполнению. Для оценки соблюдения правил изготовитель двигателя должен предоставить полный комплект документации, где должно быть предписано правило переключения и записи режимов уровня нейтрализации NO_x (рис. 5).

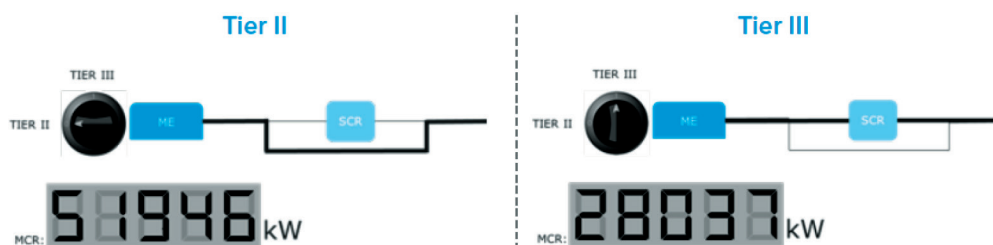


Рис. 5. Переключение режимов работы двигателя

На данный момент все двойные рейтинги двигателя и подходы к использованию SCR уменьшенной производительности рассматриваются на индивидуальной основе. В любом случае для уровней стандартов Tier II и Tier III режимы работы должны быть проверены на испытательном стенде. Оба рейтинга должны быть указаны на шильде двигателя, как показано на рис. 6.

Engine Type		MCR for TIER II	
No. Of Cylinders		52.000 kW at	RPM
Bore	mm	MCR for TIER III	
Stroke	mm	29.500 kW at	RPM
Serial Number			
Year of build			

Рис. 6. Шильда двигателя с двойным рейтингом

Исходя из ранее изложенного о системах селективного каталитического восстановления, можно сделать вывод о том, что система SCR, являясь периферийной по отношению к двигателю, оказывает минимальное влияние на процессы, протекающие в цилиндре, и способна гарантированно обеспечить достижение требований стандарта Tier III. В табл. 1 приведены достоинства и недостатки системы, которые необходимо учитывать при выборе этого способа соответствия требованиям стандарта Tier III.

Таблица 1

Достоинства и недостатки SCR

Достоинства	Обеспечение возможности сокращения выбросов оксидов азота более чем на 80 % и достижение соответствие эмиссии NOx уровня стандарта Tier III
	Минимальное воздействие на рабочие процессы в двигателе, отсутствие требований к изменению конструкции двигателя
	Достаточно эффективное удаление NOx для большинства режимов работы двигателя
	Доступная и отработанная технология, растущая справочная база, более трехсот установок по всему миру
Недостатки	Ограниченное удаление NOx при низких нагрузках двигателя (маневрирование, операции динамического позиционирования и т. д.)
	Занимает дополнительное пространство машинного отделения, необходим резервуар для хранения мочевины на борту. Требуется периодическое пополнение запасов мочевины
	Может привести к незначительному увеличению расхода топлива двигателем (менее чем на 1 %)
	Дополнительные расходы на потребление мочевины в районах NOx ECA (примерно до 8 % дополнительно к стоимости расходуемого топлива)
	Использование SCR связано с увеличением расхода топлива энергетической установкой в основном за счет работы подсистем обеспечения реакций восстановления

В заключение рассмотрения технологии SCR необходимо отметить, что система каталитического восстановления оксидов азота достаточно широко апробирована с конца прошлого века в двигателях автотранспортного назначения и хорошо себя зарекомендовала в достижении требований стандарта Евро 5 и выше. Поэтому адаптация автомобильных приложений систем SCR к судовым ДВС является в основном сугубо технической задачей.

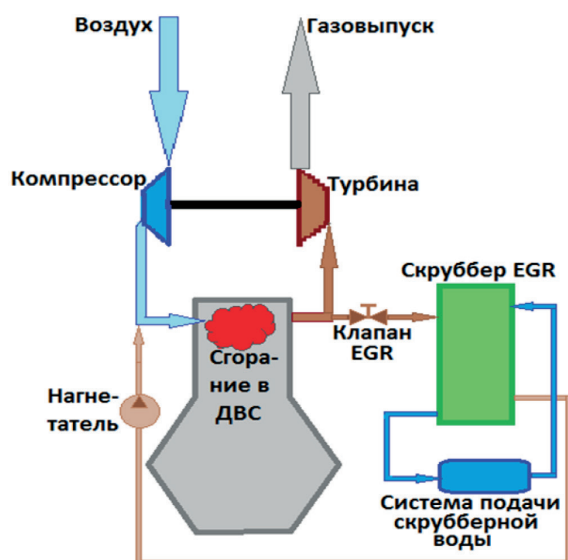
Система рециркуляции отработавших газов (EGR). Так же, как и системы SCR, системы рециркуляции отработавших газов широко доступны в автотранспортном приложении как технологии сокращения эмиссии NO_x и снижения шумности работы дизельного двигателя. Несмотря на периферийное расположение, системы EGR можно отнести к внутренним технологиям двигателя, поскольку они оказывают непосредственное влияние на протекание внутрицилиндровых процессов.

Концепция EGR основана на двух факторах влияния. Во-первых, подмешивание продуктов сгорания в свежий заряд цилиндра сокращает количество кислорода в камере сгорания, тем

самым замедляя скорость протекания реакций окисления углеводородов, препятствуя резкому росту температур в цикле дизельного двигателя и, как следствие, окислению молекул азота воздуха. Одновременно в заряде цилиндра уменьшается количество свободного кислорода, способного вступить в реакцию образования NO_x . Во-вторых, добавление в свежий заряд цилиндра продуктов сгорания, в частности, углекислого газа, обладающего высокой теплоемкостью, приводит к дополнительному снижению температур сгорания в цикле, что в свою очередь также приводит к снижению образования NO_x . Побочным эффектом уменьшения концентрации O_2 в камере сгорания двигателя является потенциальная возможность увеличения содержания сажи в отработавших газах, что необходимо учитывать при реализации рассматриваемой технологии.

Отработавшие газы для осуществления рециркуляции могут отводиться из зоны высокого давления газа (перед турбиной турбокомпрессора). В этом случае система называется *EGR высокого давления* — рис. 7, а. В системах EGR низкого давления отвод отработавшего газа производится после турбины, как показано на рис. 7, б. Обе конфигурации доступны на рынке. При этом текущие исследования демонстрируют, что системы EGR низкого давления позволяют снизить начальные и эксплуатационные расходы.

а)



б)

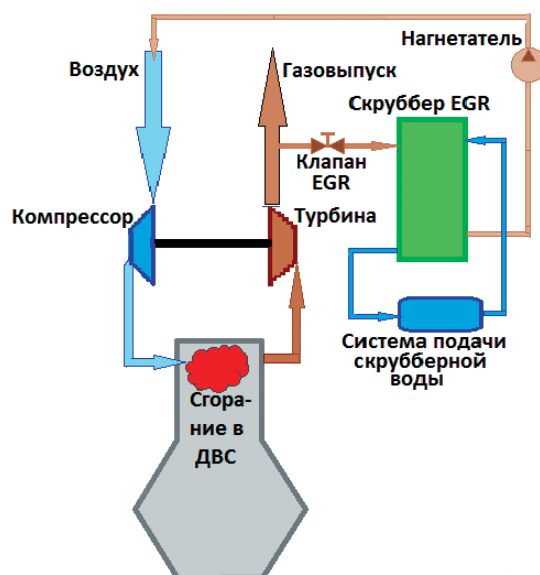


Рис. 7. Системы EGR:

а — высокого давления; б — низкого давления

Во избежание облитерации проточных частей системы впуска твердыми включениями, содержащимися в отработавших газах двигателя, участвующих в рециркуляции, как это часто происходит в автотранспортных приложениях, а также для предотвращения коррозии и образования сажи в камере сгорания отработавший газ необходимо очистить. По этой причине системы EGR оснащены небольшим скруббером, функционирование и конструкция которого идентичны скрубберу SO_x [7] или скрубберу систем инертного газа, используемых на танкерах, гораздо меньшей производительности. Требования, предъявляемые к промывочной воде скруббера EGR, аналогичны требованиям к скрубберной воде в системах сокращения выбросов SO_x . По этой причине современные системы рециркуляции отработавших газов оснащены системой очистки промывочной воды, которая в большинстве случаев также требует подачи едкого натра (NaOH). В перспективе ИМО необходимо разработать руководство по выпуску отводимой воды из систем EGR снижения выбросов NO_x . Для сбора шлама из скруббера EGR требуется специальный резервуар, так как шлам, выделенный из отработавших газов в системе очистки, не должен смешиваться с другими отходами, накопившимися на борту корабля.

В связи с тем, что EGR — это процесс, интегрированный в двигатель, технология EGR имеет существенное преимущество в случае возникновения вопроса о требованиях к пространству для размещения системы. При использовании EGR габариты двигателя остаются практически неизменными, а система подачи, хранения и подготовки скрубберной воды может быть гибко размещена в пространстве машинного отделения. Тем не менее размещение установок систем скрубберной воды, резервуаров для каустической соды и шлама должны быть приняты во внимание на стадии проектирования. Поскольку система EGR оказывает влияние на процесс сгорания, возможно некоторое увеличение расхода топлива и дымности отработавших газов. Также при выборе системы в качестве способа соответствия требованиям стандарта Tier III следует учитывать определенное снижение располагаемой тепловой энергии для систем утилизации энергии отработавших газов.

Несмотря на то, что начальные инвестиционные затраты на создание силовых установок с технологией EGR оказываются более высокими, чем для систем SCR, эксплуатационные расходы системы в большинстве случаев ниже. Тем не менее, в отличие от двигателей автотранспортного назначения, в которых системы EGR получили широкое распространение, процесс использования систем рециркуляции отработавших газов для крупных судовых двигателей не представляется достаточно широко апробированным. Ведущие производители судовых ДВС проявляют все большую заинтересованность к рассматриваемой технологии. К примеру, MAN Diesel & Turbo объявила о получении сертификата IMO для использования двухтактного двигателя MAN B & W 6G70ME-C9.5 с интегрированной системой EGR¹. Суда Suezmax будут первыми с укладкой килля после 1 января 2016 г., официально сертифицированными как соответствующие ограничениям на выбросы Tier III в рамках существующих норм выбросов NOx в Северной Америке (районы контроля NECA) и США (NECA Карибского моря). Такое состояние дел способствует накоплению опыта в области выявления особенностей эксплуатации судовых систем рециркуляции отработавших газов и развитию нормативной базы. Далее необходимо выполнить сопоставление двух рассмотренных технологий в эксплуатационных и инвестиционных аспектах. Основные данные представлены в форме табл. 2.

Таблица 2

Сопоставление характеристик систем EGR и SCR

Фактор влияния	EGR	SCR
Влияние на процесс сгорания в двигателе	Снижение эффективности	Не оказывает влияния
Влияние на ресурсные показатели двигателя	Не исключается	Не оказывает влияния
Требования к пространству для размещения системы	Система компактна	Требуется дополнительный объем машинного отделения
Производство шлама	Да	Нет
Требования к сбору, хранению и переработке побочных продуктов	Необходимо соблюдение	Требования отсутствуют
Опыт использования в судостроении	Ограничен	Да
Возможность совмещение технологии со скруббером SO _x	Да	Необходим учет специальных условий
Возможность использования тяжелых топлив (HFO)	Использование возможно	Не рекомендуется
Эксплуатационные расходы	Низкие	Высокие
Влияние на топливную экономичность установки	Ухудшение до 4 %	Крайне незначительное, менее 1 % в сторону снижения

¹ MAN Diesel & Turbo Delivers World's First IMO-Certified Two-Stroke Engine with Tier III NOx Control, Exhaust Gas Recirculation Systems. [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://corporate.man-es.com/press-media/news-overview/details/2016/04/04/MAN-Diesel-Turbo-Delivers-World-s-First-IMO-Certified-Two-Stroke-Engine-with-Tier-III-NOx-Control-Exhaust-Gas-Recirculation-Systems>.

Использование альтернативных видов топлива. Использование альтернативных видов топлива, таких как сжиженный природный газ (Liquefied Natural Gas (LNG)), сжиженный газ (Liquefied Petroleum Gas (LPG)), метанол и др. в обедненной смеси двигателей реализует еще одно средство для снижения выбросов NO_x. Применение обедненных смесей природного газа в двигателе внутреннего сгорания способно уменьшать выбросы NO_x до 80–90 %, тем самым обеспечивая соблюдение требований стандарта Tier III. Тем не менее следует отметить, что концентрация NO_x в отработавших газах в значительной степени зависит от способа организации процесса сгорания, вне зависимости от типа используемого топлива. В случае использования в двигателе цикла с принудительным воспламенением топлива (*цикл Отто*) при работе на природном газе или других альтернативных видов топлива пиковые температуры заряда цилиндра уменьшаются по сравнению с максимальными температурами цикла современного дизельного двигателя. Совместное влияние уменьшенного содержания кислорода в камере сгорания двигателя Отто по сравнению с зарядом камеры дизельного двигателя и снижение пиковых температур в цикле создают предпосылки для ограничения образования оксидов азота в рабочем процессе двигателя. Из всех доступных альтернативных видов топлива наиболее высокий потенциал снижения эмиссии NO_x обеспечивает сжиженный природный газ LNG, поскольку другие альтернативные виды топлива в настоящее время широко не используются. Ожидаемые результаты использования альтернативных видов топлива с акцентированием внимания на LNG сведены в табл. 3.

Таблица 3

Преимущества и недостатки использования LNG

Достоинства	Потенциально низкие эксплуатационные расходы, особенно для энергетических установок газозовозов и при возможности оплаты топлива судовладельцем / оператором без посредников
	Использование LNG обеспечивает одновременное достижение соответствия требованиям IMO по выбросам SO _x и NO _x для четырехтактных двигателей (100 % удаление SO _x и до 85 % удаления оксидов азота из отработавших газов). Для двухтактных двигателей сокращение NO _x составляет примерно 40 %
	Использование технологий двухтопливных двигателей (газодизель) открывают доступ к разным видам топлива и обеспечивают возможность использования в качестве топлива перевозимых грузов (танкеры, газозовозы)
	Постоянно растущая правовая база и поддержка стандартизации LNG в качестве «экологически чистого» топлива
	Постоянно растущий интерес операторов торгового флота к использованию LNG в качестве топлива
Недостатки	Организация судовых систем хранения LNG в настоящее время все еще требуют значительных инвестиций.
	Недостаточно развитая инфраструктура использования LNG. Схемы бункеровки находится в стадии разработки
	Системы хранения LNG достаточно громоздки и поглощают часть грузового пространства судна

Следует отметить, что особую привлекательность в экологическом аспекте концепция LNG имеет в свете совместного рассмотрения вопросов соответствия по выбросам оксидов серы, азота и твердых частиц. Более подробные сведения об использовании СПГ в качестве топлива и финансовых аспектов применения альтернативных видов топлива можно найти в источниках [8], [9].

Другие доступные технологии соответствия. Помимо SCR, EGR и использования альтернативных видов топлива, доступны и другие технологии, к которым, в первую очередь, следует отнести непосредственный (прямой) впрыск воды в цилиндр (Direct Water Injection (DWI)), водотопливную эмульсию (Fuel-Water Emulsion (FWE)), увлажнение всасываемого воздуха (Intake air

Humidification and Humid air Motors (HAM)) и др., однако эти технологии не получили широкого распространения и в основном находятся в стадии разработки.

Впрыскивание пресной воды в свежий заряд цилиндра способно уменьшать температуру процесса сгорания за счет отбора от заряда энергии, необходимой на совершение фазового перехода (теплота парообразования) и подогрев образующегося водяного пара. Как показывают исследования [10], [11], в настоящее время с технологией DWI возможно достижение только 50 % снижения выбросов NO_x . Это означает, что данная технология не позволяет в полной мере обеспечить достижение требований стандарта Tier III. Кроме того, в ходе реализации технологии возникают дополнительные проблемы, связанные с организацией бункеровки или производства, мест хранения и подготовки пресной воды, необходимой для распыливания.

Технология использования водо-топливных эмульсий имеет довольно долгую историю. При применении FWE пресная вода смешивается с топливом на борту судна до того, как смесь подается в камеру сгорания. Испарение воды в объеме топливного факела вызывает локальное охлаждение заряда цилиндра и снижение температур сгорания топливно-воздушной смеси, тем самым уменьшая образование NO_x . Результаты исследовательских работ свидетельствуют о том, что в среднем каждый процент воды в смеси с топливом пропорционально уменьшает выбросы NO_x (примерно на процент). Исходя из особенностей образования эмульсий, уровень снижения NO_x может составить до 30 %, что не позволит обеспечить достижение требований стандарта. Также необходимо принимать во внимание, что применение водотопливных эмульсий связано со значительным усложнением топливной системы энергетической установки за счет установки дополнительного оборудования и требует существенных финансовых инвестиций, а также тот факт, что FWE вызывают повышенные износы топливоподающих систем дизельного двигателя и при отклонении технологии использования способны нанести непоправимый ущерб конструкции.

В системах увлажнения всасываемого воздуха HAM горячий наддувочный воздух от компрессора увлажняется либо за счет прямой подачи пара, генерируемого из морской воды, либо за счет впрыскивания во впускной тракт двигателя пресной воды под высоким давлением, образуя небольшие капли воды для дальнейшего испарения. В результате увеличивается теплоемкость воздуха, что позволяет ему поглощать больше тепла, при этом одновременно в воздухе сокращается содержание кислорода. Это приводит к более низкой температуре горения в двигателе, таким образом, уменьшая тенденцию образования NO_x в процессе сгорания. Принципиально технология увлажнения всасываемого воздуха HAM может уменьшить выбросы NO_x от 30 до 70 %. При этом нужно принимать во внимание, что увлажнение воздуха на впуске в современных типах двигателей, имеющих высокое давление наддува, ограничено ввиду относительно низких температур точки росы водяного пара при высоком давлении. Потенциал технологии увлажнения всасываемого воздуха HAM в настоящее время находится в стадии дальнейшего исследования.

Близкими по идеологии к технологиям HAM и EGR являются разработки Asahi Kasei Chemicals Corporation (Япония) на основе мембраны для снижения содержания кислорода (ORM — Oxygen Reduction Membrane) [12]. Эта система снижает выбросы NO_x путем уменьшения концентрации кислорода в используемом двигателем воздухе. Система ORM устанавливается на стороне впуска газо-воздушного тракта, поэтому на ее работу не оказывают влияние ни вид топлива (например, мазут, морское дизельное топливо или газ), ни его отдельные характеристики (например, содержание серы). Выполненные экспериментальные исследования демонстрируют достижение требований стандарта Tier III при сокращении концентрации кислорода в подаваемом на впуск воздухе с 21 % до 17 % и менее.

Отдельный интерес могут представлять технологии сокращения эмиссии NO_x путем непосредственного воздействия на внутрицилиндровые процессы, к которым можно отнести внутрисистемную каталитическую обработку топлива, специальное управление процессом сгорания путем использования электронно-управляемых систем впрыска, управление температурой заряда

цилиндра посредством изменения фаз газораспределения для реализации цикла Миллера и др. Однако рассмотрение этих технологий, глубоко интегрированных в конструкцию двигателя, выходит за рамки рассмотрения предлагаемой публикации.

Заключение (Conclusion)

Ожидаемое расширение зон контроля эмиссии NO_x в бассейне Балтийского и Северного морей побуждают судовладельцев и операторов судов, осуществляющих деятельность в этих регионах, к обдумыванию своей стратегии дальнейшей деятельности в новых зонах NECA. Выбор стратегии соответствия новым требованиям ИМО по ограничению эмиссии оксидов азота энергетическими установками новых или модернизируемых судов оказывается сложным решением на альтернативной основе. В качестве способов соответствия необходимо рассматривать разработанные и вновь разрабатываемые технологии, такие как селективное каталитическое восстановление, рециркуляция отработавших газов, использование альтернативных видов топлива, применение водо-топливных эмульсий, непосредственный (прямой) впрыск воды в цилиндр, увлажнение всасываемого воздуха, снижение концентрации кислорода в воздухе, подаваемом на наполнение цилиндра, специальное управление внутрицилиндровыми процессами и некоторые другие. При этом любой из доступных вариантов должен обеспечивать неуклонное достижение требований стандарта Tier III. Соответствие судовой энергетической установки стандарту Tier III по эмиссии NO_x делает суда более привлекательными для фрахтователей, обеспечивает премиальные тарифы в портовых сборах целого ряда портов и высокий рейтинг таких судов на вторичном рынке.

Лидером среди технологий сокращения выбросов оксидов азота является SCR. Технология SCR гарантированно обеспечивает достижение требований стандарта Tier III по эмиссии NO_x , не требуя вмешательства в конструкцию двигателя. Она затрагивает только систему газораздачи, что объясняет повышенный интерес к системе в плане модификации установок. Однако система каталитического восстановления NO_x имеет существенный недостаток, который помимо необходимости выделения специального пространства в машинном отделении и дополнительных финансовых затрат на реагенты связан с возникающими сложностями поддержания условий протекания процесса восстановления на режимах малой мощности ввиду низких температур отработавших газов. Данный фактор представляет серьезные, но не являющиеся непреодолимыми трудности.

Систему EGR можно рассматривать как вторую в рейтинге технологий сокращения эмиссии NO_x . Она достаточно хорошо зарекомендовала себя в автотранспортных приложениях и способна обеспечивать требования Tier III по эмиссии NO_x на любых эксплуатационных режимах. При этом система рециркуляции отработавших газов оказывает непосредственное воздействие на протекание внутрицилиндровых процессов двигателя и требует проведения определенных дополнительных настроек рабочего процесса, которые могут быть выполнены только заводом-изготовителем. Кроме того, система требует удаления высокотоксичного шлама, образующегося при очистке отработавших газов, участвующих в рециркуляции, нормативная база утилизации которого пока находится в стадии доработки.

Не менее надежным, чем EGR и SCR, способом соблюдения требований стандарта Tier III является использование альтернативных видов топлива, в основном LNG. Результат сокращения выбросов NO_x от использования альтернативных видов топлива напрямую зависит от технологии двигателя. В случае двигателя с принудительным воспламенением топливовоздушной смеси следует ожидать сокращение NO_x до 90 % от уровня Tier I.

Повышенный спрос на двигатели, соответствующие стандарту Tier III по эмиссии NO_x , в связи с расширением зон NECA создаст дополнительную мотивацию заводам-изготовителям судовых двигателей к поиску и внедрению новых конструкторских решений, направленных на снижение содержания в отработавших газах оксидов азота, а также доработку и более широкое использование уже известных способов борьбы с эмиссией NO_x . В свою очередь, увеличение assor-

тимента выпускаемых экологически безопасных двигателей значительно увеличит возможности выбора способа соответствия новым требованиям ИМО для судовладельцев и проектировщиков.

Необходимо также отметить, что обеспечение экологических требований стандарта Tier III для широкого диапазона эксплуатационных режимов работы судовой энергетической установки представляется комплексной задачей, решение которой может быть достигнуто в конструкции двигателя одновременной реализацией различных технологий сокращения выбросов NO_x .

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. 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.
5. 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.
6. Международная конвенция по охране человеческой жизни на море 1974 года (СОЛАС–74). (Консолидированный текст, изм. Протоколом 1988 г. к ней, с поправками). — СПб.: АО «ЦНИИМФ», 2015. — 1088 с.
7. 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.
8. 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.
9. 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.
10. Hountalas D. T. Use of water emulsion and intake water injection as NO_x reduction techniques for heavy duty diesel engines / D. Hountalas, G. Mavropoulos, T. Zannis, S. Mamalis. — SAE Technical Paper, 2006. — №. 2006-01-1414. DOI: 10.4271/2006-01-1414.
11. Brusca S. Evaluation of the effects of water injection in a single cylinder CFR cetane engine / S. Brusca, R. Lanzafame. — SAE Technical Paper, 2001. — №. 2001-01-1212. DOI: 10.4271/2001-01-1212.
12. Khotseng L. Oxygen Reduction Reaction / L. Khotseng // Electrocatalysts for Fuel Cells and Hydrogen Evolution - Theory to Design. — 2018. DOI: 10.5772/intechopen.79098.

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 admirala S. O. Makarova* 3(31) (2015): 103–112. DOI: 10.21821/2309-5180-2015-7-3-103-112.
4. Semanov, G. N. "Vrednye vybrosy v atmosferu ot sudov: na puti k standartam IMO." *Nauka i transport. Mor-skoj i rechnoj transport* 1(5) (2013): 45–47.
5. 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.
6. 1974 *International Convention for the Safety of Life at Sea (SOLAS-74)*. (Consolidated text as amended by the 1988 Protocol to it, as amended). St. Petersburg: JSC TsNIIMF, 2015.
7. 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.
8. 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.
9. 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.
10. Hountalas, Dimitrios Theofanis, G. Mavropoulos, T. Zannis, and S. Mamalis. *Use of water emulsion and intake water injection as NOx reduction techniques for heavy duty diesel engines*. No. 2006-01-1414. SAE Technical Paper, 2006. DOI: 10.4271/2006-01-1414
11. Brusca, S., and R. Lanzafame. *Evaluation of the effects of water injection in a single cylinder CFR cetane engine*. No. 2001-01-2012. SAE Technical Paper, 2001. DOI: 10.4271/2001-01-2012.
12. Khotseng, Lindiwe. "Oxygen Reduction Reaction." *Electrocatalysts for Fuel Cells and Hydrogen Evolution - Theory to Design*. 2018. DOI: 10.5772/intechopen.79098.

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 27 декабря 2019 г.
 Received: December 27, 2019.