

СУДОВЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ И ИХ ЭЛЕМЕНТЫ (ГЛАВНЫЕ И ВСПОМОГАТЕЛЬНЫЕ)

DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-5-845-857

EFFICIENCY OF LIMITING NITROGEN OXIDES EMISSIONS BY EXHAUST GAS RECIRCULATION SYSTEMS OF MARINE INTERNAL COMBUSTION ENGINES

G. E. Zhivljuk, A. P. Petrov

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

The subject of this study is systems for ensuring environmental safety of marine internal combustion engines, in particular, technologies for limiting emissions of nitrogen oxides (NO_x). The regulatory requirements for reducing emissions are presented in the paper. The main theoretical aspects of the problem of nitrogen oxides formation during combustion in a diesel engine are considered. On the basis of these theoretical aspects the effectiveness of using various methods to achieve the requirements for the permissible level of NO_x concentration in the exhaust gases is assessed. Exhaust gas recirculation (EGR) systems and selective catalytic reduction (SCR) systems are considered as the main technologies; they allow achieving the highest indicators of nitrogen oxide emissions control in accordance with the requirements of the Tier 3 standard. Taking into account the peculiarities of the requirements for the design and layout of systems as part of a ship power plant, as well as operational and investment costs, the main attention in the work is paid to systems of indirect influence on the engine in-cylinder processes, which include exhaust gas recirculation systems. Based on the comparison of high and low pressure EGR, the advantages and disadvantages of the designs are determined. It is noted that high-pressure exhaust gas recirculation systems have a number of advantages, which primarily include the compactness and high speed of the system response to changes in operational conditions. On the example of the leading manufacturers developments, the potential capabilities of the high-pressure EGR system and the engine characteristics confirming the effectiveness of its use are demonstrated. Based on the results of the work, a conclusion about the high efficiency and expediency of using exhaust gas recirculation systems to meet the requirements of the current environmental safety standards of ship power plants is made.

Keywords: marine internal combustion engine, environmental safety, emission of nitrogen oxides, exhaust gas recirculation system, achievement of regulatory requirements.

For citation:

Zhivljuk, Grigorij E., and Aleksandr P. Petrov. "Efficiency of limiting nitrogen oxides emissions by exhaust gas recirculation systems of marine internal combustion engines." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 15.5 (2023): 845–857. DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-5-845-857.

УДК 621.43.074

ЭФФЕКТИВНОСТЬ ОГРАНИЧЕНИЯ ВЫБРОСОВ ОКСИДОВ АЗОТА СИСТЕМАМИ РЕЦИРКУЛЯЦИИ ОТРАБОТАВШИХ ГАЗОВ СУДОВЫХ ДВС

Г. Е. Живлюк, А. П. Петров

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

Предметом настоящего исследования являются системы обеспечения экологической безопасности судовых двигателей внутреннего сгорания, в частности, технологии ограничения выбросов оксидов азота (NO_x). В работе приведены нормативные требования по сокращению выбросов и рассмотрены основные

теоретические аспекты проблемы образования оксидов азота в процессе сгорания в дизельном двигателе, на основании которых произведена оценка эффективности применения различных способов достижения требований к допустимому уровню концентрации NO_x в составе отработавших газов. В качестве основных технологий рассмотрены системы рециркуляции отработавших газов (EGR) и системы селективного каталитического восстановления (SCR) как технологии, позволяющие добиться достижения наивысших показателей ограничения выбросов оксидов азота в соответствии с требованиями стандарта Tier третьего уровня. Учитывая особенности требований к конструкции и компоновке систем в составе судовой энергетической установки, а также эксплуатационные и инвестиционные затраты, основное внимание в работе уделено системам опосредованного влияния на внутрицилиндровые процессы двигателя, к которым относятся системы рециркуляции отработавших газов. На основании сопоставления EGR высокого и низкого давления определены преимущества и недостатки конструкций. Отмечается, что системы рециркуляции отработавших газов высокого давления имеют ряд преимуществ, к которым в первую очередь следует отнести компактность и высокую скорость реагирования системы на изменение эксплуатационных режимов. На примере разработок ведущих производителей продемонстрированы потенциальные возможности системы EGR высокого давления и характеристики двигателя, подтверждающие эффективность ее использования. На основе результатов работы сделано заключение о высокой эффективности и целесообразности использования систем рециркуляции отработавших газов для соблюдения требований действующих стандартов экологической безопасности судовых энергетических установок.

Ключевые слова: двигатель внутреннего сгорания, экологическая безопасность, эмиссия оксидов азота, системы судового двигателя, рециркуляция отработавших газов, достижение нормативных требований.

Для цитирования:

Живлюк Г. Е. Эффективность ограничения выбросов оксидов азота системами рециркуляции отработавших газов судовых ДВС / Г. Е. Живлюк, А. П. Петров // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2023. — Т. 15. — № 5. — С. 845–857. DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-5-845-857.

Введение (Introduction)

Сжигание углеводородных топлив в камерах сгорания поршневых ДВС приводит не только к образованию «чистых» продуктов полного окисления углеводородов, к которым относятся вода и углекислый газ, но и сопряжено с выбросом ряда вредных побочных продуктов, способных нанести урон окружающей среде. К токсичным компонентам в составе отработавших газов относятся оксиды азота (NO_x), оксиды серы (SO_x), твердые частицы (PM) и несгоревшие углеводороды. Вредные выбросы, производимые судовыми двигателями, регламентированы Правилами предотвращения загрязнения воздуха с судов, определенными Прил. VI к Конвенции МАРПОЛ 73/78¹.

Достижение требований действующих норм экологической безопасности судовых энергетических установок является основной проблемой современного судостроения и в ряде случаев отодвигает на второй план вопросы топливной экономичности. Это обстоятельство главным образом относится к оксидам азота. В то время как образование оксидов серы, твердых частиц и несгоревших углеводородов определяется исключительно элементарным составом используемого топлива, выбросы оксидов азота зависят не только от наличия азота в составе топлива (даже в тяжелых остаточных топливах массовая доля азота не превышает 0,3–0,5 %), но и в значительной мере от условий протекания процессов тепловыделения в камере сгорания двигателя, исходя из того, что реагенты являются основой состава свежего заряда воздуха в цилиндре.

Составляя значительную часть вредных выбросов дизельного двигателя, эмиссия оксидов азота постоянно находится под пристальным вниманием производителей и вынуждает предпринимать конструктивные и иные меры по сдерживанию этого фактора вредного воздействия на окружающую среду. В современном двигателестроении разработаны и получают дальнейшее развитие различные методы и устройства для сокращения содержания NO_x в составе отработавших газов, среди которых наиболее эффективными оказываются технологии селективного каталитического восстановления (SCR) и рециркуляции отработавших газов (EGR), позволяющие гарантированно достичь соответствия самым высоким уровням стандартов экологической безопасности энергетических установок.

¹ Международная Конвенция по предотвращению загрязнения с судов 1973г., измененная протоколом 1978 г. к ней (МАРПОЛ-73/78). СПб.: ЗАО «ЦНИИМФ», 2008. Кн. I и II. 862 с.

Указанные технологии принципиально отличаются фактором влияния на внутрицилиндровые процессы поршневого ДВС, выявляя тем самым ряд преимуществ и недостатков данных систем. При этом системы рециркуляции отработавших газов обеспечивают компактность конструкции, низкие эксплуатационные затраты и не выдвигают отдельных требований к используемым топливам.

Целью настоящей работы является рассмотрение и анализ разрабатываемых схем систем рециркуляции отработавших газов применительно к судовым ДВС с позиций оценки их эффективности в достижении требований экологических стандартов.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Международная морская организация (ИМО) с 1999 г. предпринимает активные меры по поэтапному ограничению выбросов NO_x с отработавшими газами судовых двигателей, приняв за основу регламентации стандарт экологической безопасности США Tier, распространяющийся на все двигатели, исключая двигатели автотранспортного назначения. Начиная с 01 января 2011 г. для всех районов плавания действует глобальное ограничение по выбросам оксидов азота в соответствии со стандартом Tier II (табл. 1). В то же время выбросы NO_x любого дизельного двигателя, установленного на судне, построенном позднее 1 января 2016 г., должны соответствовать уровню стандарта Tier III при эксплуатации в зоне контроля выбросов (NECA), расположенной вдоль побережья Северной Америки [1]. В случаях, когда зоны NECA назначаются позднее, требования стандарта Tier III предъявляются только к судам, построенным на дату назначения или позже. Так, для зоны контроля в Северной Европе требования стандарта Tier III применяются к судам постройки позднее 1 января 2021 г.

Таблица 1

Требования стандартов Tier к выбросам оксидов азота судовыми ДВС

Уровень стандарта	Дата и зона назначения	Частота вращения коленчатого вала двигателя n , об/мин		
		$n \leq 130$	$n = 130 - 1999$	$n \geq 2000$
Tier I	01.01.2000 г. для всех регионов	17,0 г/кВт·ч	$45n^{(-0,2)}$ г/кВт·ч	9,8 г/кВт·ч
Tier II	01.01.2011 г. для всех регионов	14,4 г/кВт·ч	$44n^{(-0,23)}$ г/кВт·ч	7,7 г/кВт·ч
Tier III	01.01.2016 г. для NECA Северной Америки	3,4 г/кВт·ч	$9n^{(-0,2)}$ г/кВт·ч	2,0 г/кВт·ч
Tier III	01.01.2021 г. для NECA Северной Европы	3,4 г/кВт·ч	$9n^{(-0,2)}$ г/кВт·ч	2,0 г/кВт·ч

В современном двигателестроении разработано достаточно большое количество технологий сокращения эмиссии NO_x , основные и наиболее применимые из которых могут быть классифицированы в соответствии со схемой рис. 1. Согласно требованиям ИМО допускается использование любой технологии снижения выбросов NO_x в целях обеспечения соответствия двигателя действующим стандартам.

Анализ эффективности применения и эксплуатационных характеристик технологий, выполненный ранее в [2], выдвигает на первый план системы рециркуляции отработавших газов и селективного каталитического восстановления как технологии достижения полного соответствия энергетической установкой требований стандарта Tier III. При этом система SCR, являясь независимой и автономной в использовании, не оказывает воздействия на протекание внутрицилиндровых процессов двигателя, что выгодно отличает ее от альтернативных технологий сокращения выбросов. Однако, несмотря на свою распространенность и апробированность в конструкциях энергетических установок, SCR имеет внушительные габариты, что создает определенные проблемы в его размещении и, кроме того, протекание каталитических реакций требует поддержания температурного режима, обеспе-

чение которого оказывается затруднительным на отдельных режимах низкой мощности, особенно для двухтактных двигателей. Кроме того, система требует постоянного использования реагентов, расход которых по стоимости может превышать 8 % стоимости используемого топлива, а использование дорогостоящих конструкций и материалов сказывается на инвестиционной стоимости установки. Весьма критичными являются требования к используемому топливу, система требует соблюдения ряда значимых условий, касающихся использования тяжелых высокосернистых топлив и компоновки систем очистки отработавших газов от оксидов серы; задействование системы сопряжено с дополнительными нагрузками на экипаж судна.



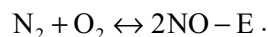
Рис. 1. Наиболее распространенные способы ограничения выбросов NO_x

Исходя из особенностей и недостатков систем каталитического восстановления оксидов азота, более привлекательными в использовании представляются системы EGR. Системы рециркуляции отработавших газов позволяют достичь соответствия третьему уровню стандарта выбросов NO_x без значительного роста эксплуатационных расходов, не накладывают ограничений на используемые виды топлив, компактно вписываются в конструкцию двигателя без существенного увеличения габаритов судовой энергетической установки, обеспечивают хорошую совместимость с другими методами очистки отработавших газов от вредных выбросов (включая SO_x , несгоревшие углеводороды и твердые частицы).

Рассматривая системы EGR, необходимо учитывать, что они в процессе работы оказывают опосредованное влияние на протекание всех стадий процесса сгорания в цилиндре ДВС. Несмотря на значительный интерес исследователей и высокую значимость для теории тепловых двигателей процессов тепловыделения, механизм сгорания углеводородов в камере сгорания двигателя представляется наименее изученным среди других процессов, составляющих цикл. Теоретическая база физики процессов горения, необходимая для расчетов и моделирования, сводится к полуэмпирическим зависимостям (см., например, [3]), в основу которых заложены общие предположения о развитии химических процессов. Большинство научных подходов к описанию процессов сгорания сводится к рассмотрению одно- или двухзонной моделей горения топливовоздушной смеси (зона компонентов смеси и зона продуктов реакции), что, в принципе, является весьма грубым приближением, поскольку фактически рассматриваемые процессы имеют гораздо более сложную многозонную

структуру [4]. В равной мере это относится и к теоретическим аспектам образования оксидов азота как неотъемлемой части процесса горения.

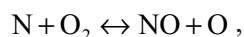
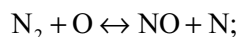
Оксиды азота NO_x — это обобщенное название монооксида NO и диоксида NO_2 , которые образуются при горении топливовоздушных смесей в различных условиях и устройствах. Основным элементом обобщенного вида NO_x в составе вредных компонентов отработавших газов поршневых ДВС является монооксид углерода, составляющий до 95 % от общей эмиссии NO_x . Формальная кинетика процесса образования монооксида описывается в виде



С учетом энергии деструктуризации молекулы кислорода 494 кДж/моль и энергии активации взаимодействия атомарного кислорода с молекулой азота 314 кДж/моль как основной реакции:



определяющей скорость процесса, энергетический барьер реакции образования NO составляет 516 кДж/моль. Такая весьма значительная энергия активации предопределяет экспоненциальную зависимость скорости образования NO от температуры. Таким образом, основные реакции образования оксидов азота связаны с высокой температурой в зонах горения. Исходя из этого механизм образования оксидов азота получил название *высокотемпературный*, или *тепловой (термический) механизм*. Фундаментальные основы механизма образования NO, включающего две элементарные стадии:



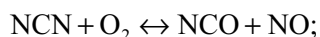
были заложены в середине прошлого века [5], [6].

Необходимо отметить, что теория образования «термических» оксидов азота, являясь основной и общепризнанной, не в полной мере отражает все процессы и, в частности, не объясняет регистрируемые в экспериментах повышенные концентрации монооксида азота во фронте пламени, где не достигается максимум температур, свойственный зоне продуктов сгорания. Также теория не объясняет тот факт, что появление оксидов азота во фронте пламени происходит вопреки существенному различию скоростей реакций (скорости образования NO, в соответствии с теорией образования термических оксидов азота, оказываются на два порядка ниже, чем скорость горения). В этой связи параллельно с теорией образования «термических» оксидов рассматривается механизм образования «быстрых» оксидов азота, предложенный в 1971 г. [7].

В соответствии с теорией «быстрых» оксидов образование NO связано с реакцией радикала CH, присутствующего на начальных стадиях деструктуризации углеводородов, с молекулярным азотом:



и далее инвариантно по сложной схеме реакций с участием различных радикалов, например:



Наряду с механизмами образования «термических» и «быстрых» оксидов азота рассматриваются также другие сценарии образования NO_x , основанные на различных постулатах, таких как развитие цепных реакций, согласно [8], превращение топливного азота [9], распад диоксида азота [10] и др. С учетом многообразия предлагаемых механизмов образования NO_x большинство исследователей сходятся во мнении, что в условиях, характерных для камеры сгорания дизельного

двигателя, термический механизм образования оксидов азота следует рассматривать как превалирующий [11]. Следствием такого допущения является основная направленность воздействия на внутрицилиндровые процессы ДВС с целью сокращения выбросов NO_x , которая состоит в максимально возможном сдерживании как динамики роста температур и достижимых максимальных температур в цикле, так и времени высокотемпературного воздействия на компоненты состава рабочего тела в цилиндре. На основе анализа влияния на скорости реакций различных факторов, главными среди которых являются температура процесса и концентрация окислителя, можно планировать такие мероприятия по специальной организации процесса сгорания, которые позволят добиться сокращения выбросов NO_x с отработавшими газами.

Температурное влияние на процессы образования NO_x (см. рис. 1) может быть оказано с помощью управления процессом топливоподачи, имеющим непосредственное влияние на тепловыделение в цилиндре двигателя и позволяющим обеспечить приемлемую динамику роста температур в ходе протекания внутрицилиндровых процессов. Сдерживания роста температур можно добиться путем введения в состав рабочего тела веществ, обладающих высокой теплоемкостью (например, воды или водяного пара). Определенные результаты в борьбе с выбросами оксидов азота могут достигаться понижением концентрации кислорода в воздухе, подаваемом в цилиндры двигателя благодаря применению мембранных технологий. Следует признать, что все эти методы, давая положительный результат по отдельности, не позволяют обеспечить в полной мере соответствие энергетической установки требованиям стандарта Tier III. Отличительной особенностью систем рециркуляции отработавших газов является то, что они оказывают двухфакторное влияние на процессы образования оксидов азота, одновременно снижая концентрацию кислорода в свежем заряде цилиндра и вводя в состав рабочего тела чистые продукты сгорания (пары воды и углекислый газ), обладающие высокой теплоемкостью, что обеспечивает EGR высокую эффективность борьбы с выбросами NO_x .

Необходимо отметить, что системы EGR имеют весьма продолжительную историю использования в высокооборотных двигателях автотранспортного назначения. Как следствие, большой накопленный опыт разработок, доводки конструкций и систем управления позволили достичь требуемых результатов. При этом рабочий процесс высокооборотного дизельного двигателя имеет отличительные черты, состоящие в кратковременном протекании и высокой динамике тепловыделения. Поэтому времени на образование оксидов азота в цикле оказывается существенно меньше, чем у малооборотных судовых двигателей. Такие особенности предопределяют лояльные требования по эмиссии NO_x , предъявляемые к малооборотным двигателям в соответствии со стандартом Tier II, составляющим 14,4 г/кВт·ч по сравнению с 7,7 г/кВт·ч для высокооборотных двигателей и 3,4 г/кВт·ч по сравнению с 2,0 г/кВт·ч по стандарту Tier III соответственно (см. табл. 1). Таким образом, адаптация технических приемов, применяемых в двигателях автомобильного класса к конструкциям судовых двигателей, требует отдельного внимания, более строгих подходов и принятия специфических решений [12].

Распространенной схемой системы EGR малоразмерных высокооборотных двигателей является «комбинированная система рециркуляции» с отбором отработавших газов повышенного давления из выпускного коллектора (перед турбиной) и подачей их через управляющий клапан в зону разряжения во впускном тракте перед компрессором, которая максимально упрощает конструкцию системы, обеспечивая ее компактное расположение в ограниченных объемах подкапотного пространства. В более сложных системах возможно использование теплообменных аппаратов с целью частичного охлаждения рециркулирующего газа. Такая компоновка системы приводит к облитерации всего впускного тракта двигателя твердыми частицами, входящими в состав отработавших газов. Образование крупных конгломератов твердых частиц в местах возникающих турбулентностей во впускных каналах несет определенные риски для работоспособности двигателя, так как в случае срыва образований потоком и при попадании в цилиндры твердые частицы способны помимо инициирования повышенных износов деталей цилиндропоршневой группы, седел и рабочих фасок

клапанов нанести двигателю критические повреждения, а именно привести к удару движущимся поршнем по открытому клапану со всеми вытекающими последствиями — изгибу, а в самых тяжелых случаях — к обрыву клапана. Такие риски совершенно недопустимы для двигателей судового назначения, которые должны поддерживать высокую работоспособность и длительные ресурсы работы. Поэтому конструктивные схемы систем EGR крупных судовых двигателей должны предусматривать очистку рециркулирующего газа, а для повышения эффективности системы — глубокое охлаждение газа. Одновременно объемы машинного отделения, несмотря на загруженность оборудованием судовой энергетической установки, в отличие от ограниченных объемов, выделенных для установки двигателя в автотранспортном средстве, предоставляют разработчику возможность более широкого маневра в компоновке системы.

Сдерживание роста средних температур подвода тепла и увеличение продолжительности тепловыделения за счет использования в составе свежего заряда цилиндра рециркулирующих отработавших газов оказывают отрицательное воздействие на топливную экономичность двигателя. По данным испытаний систем EGR большинства производителей ухудшение топливной экономичности может достигать до 4 %. Кроме того, сдерживание скорости сгорания путем воздействия на концентрации кислорода в рабочем теле цилиндра и снижение температурного уровня процессов в основных стадиях процесса переносят сгорание на линию расширения, что может повлиять на полноту сгорания цикловой подачи топлива и вызвать повышение содержания твердых частиц — дымности отработавших газов. Из этих негативных аспектов проблемы использования систем рециркуляции отработавших газов следует, что внедрение данной технологии сдерживания эмиссии NO_x требует дополнительной настройки рабочего процесса дизельного двигателя, которая может быть реализована только разработчиком.

Несмотря на наличие указанных негативных факторов влияния на эффективность и экологичность работы двигателя, все ведущие производители крупного судового энергетического оборудования занимаются разработкой и внедрением систем EGR в конструкции выпускаемых двигателей. В отличие от схемного решения, характерного для малоразмерных высокооборотных двигателей, подача рециркулирующего газа в цилиндры судовых ДВС производится автономными нагнетателями после промывки рециркулирующих газов от твердых частиц в скрубберных системах мокрого типа (с последующим влагоотделением). В этом случае появляется вариантность конструктивных схем организации систем EGR, которая подразделяет их на EGR низкого и высокого давления. Различие состоит в месте отбора отработавших газов для рециркуляции.

Наиболее ранние исследования и апробации систем EGR применительно к судовым модификациям двигателей в основном затрагивали системы низкого давления. В системах рециркуляции низкого давления отбор газа производят после утилизационных агрегатов (турбины турбокомпрессора, утилизационного котла и др.) с давлением, близким к атмосферному, и подают во впускной тракт между воздушным фильтром и компрессором. Такое решение позволяет в полной мере использовать энергию отработавших газов в утилизационных циклах и устройствах; исключить проблему эксплуатации компонентов системы, работающих под давлением; упростить функционирование системы в части точного дозирования за счет увеличенных объемов рециркулирующего газа и снизить эксплуатационные расходы. Однако данное решение приводит к увеличению габаритов системы и, как следствие, к сложностям компоновки, а также к высокой инвестиционной стоимости.

Результаты использования системы рециркуляции с газом низкого давления, принципиальная схема которой приведена на рис. 2, рассмотрены в [13] на примере судового малооборотного двухтактного двигателя 6UEC45LSE-Eco-B2 производства Mitsubishi Heavy Industries Machinery & Engine CO. Ltd (MHI–MME). Ввиду большого объема газа, участвующего в рециркуляции, системы низкого давления проявляют низкую динамику реагирования на изменение режимов работы двигателя, что создает сложности в управлении системой на переходных режимах и, как следствие, существенно усложняет построение алгоритмов управления.

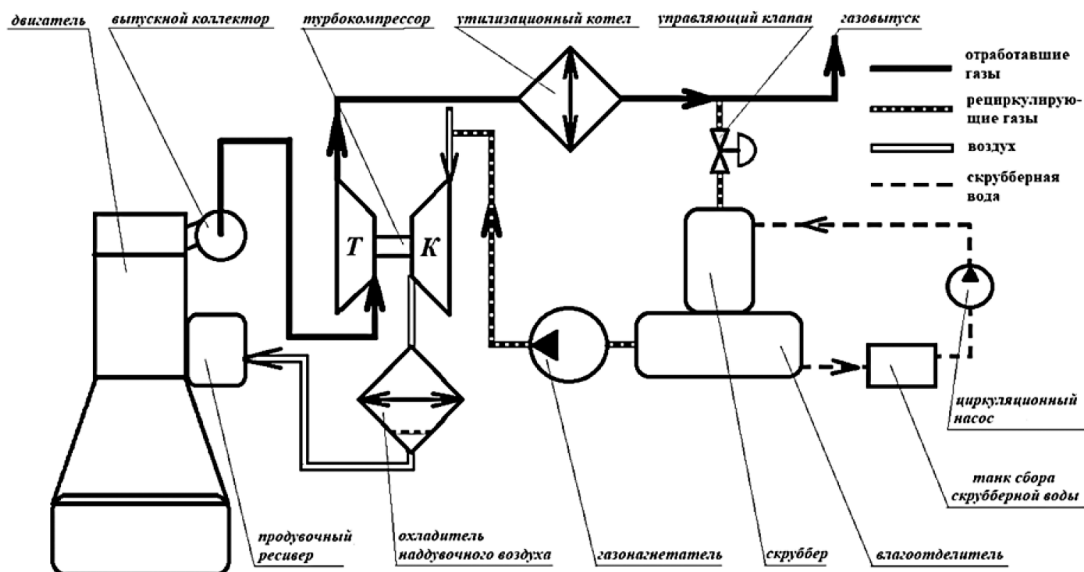


Рис. 2. Схема системы рециркуляции отработавших газов низкого давления

Системы рециркуляции отработавших газов высокого давления, в первую очередь, привлекают своей компактностью (рис. 3) и быстрым откликом на изменение режима работы двигателя, поэтому находятся под пристальным вниманием разработчиков. Наиболее показательными в этом плане являются разработки ведущего производителя судовых двигателей — MAN B&W [14].

а)

б)

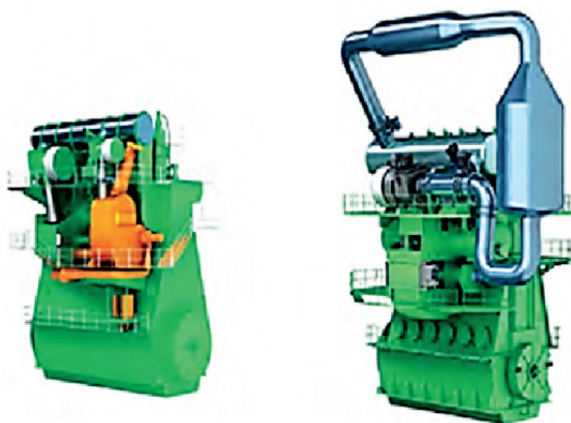


Рис. 3. Сопоставление компоновок двигателей с EGR высокого давления (а) и SCR высокого давления (б)

Система EGR высокого давления удобно интегрируется в конструкцию двигателя отдельным компактным модулем (см. рис. 3), практически не изменяя общие габариты установки, что выгодно отличает ее от системы низкого давления. Блок рециркуляции, встроенный в конструкцию двигателя подобно ресиверу продувочного воздуха (рис. 4), включает устройство для распыления промывочной воды (водораспыление), охладитель EGR, уловитель водяного тумана (устройство водоотделения) и нагнетатель рециркулирующего газа.

Схема системы рециркуляции отработавших газов высокого давления, разработанная MAN B&W для двухтактных двигателей с диаметром цилиндра до 700 мм с одним турбокомпрессором, приведена на рис. 5. Отбор газа производится непосредственно из выпускного коллектора под давлением, определяемым условиями работы системы свободного газотурбинного наддува. Устройство водораспыления, являясь аналогом скрубберной системы в составе EGR низкого давления, обе-

спечивает подачу воды для промывки рециркулирующего газа с удалением продуктов неполного сгорания топлива и твердых загрязнений. После охлаждения и отделения влаги рециркулирующий газ подается нагнетателем в точку смешения с воздухом и далее в продувочный ресивер. Система рециркуляции выключается запорным клапаном EGR, производительность системы (коэффициент рециркуляции) регулируется дроссельным клапаном вентилятора. В целях поддержания энергетического баланса турбокомпрессора и массового баланса двигателя и компрессора в системе предусмотрены байпасный клапан отработавших газов и перепускной воздушный клапан.

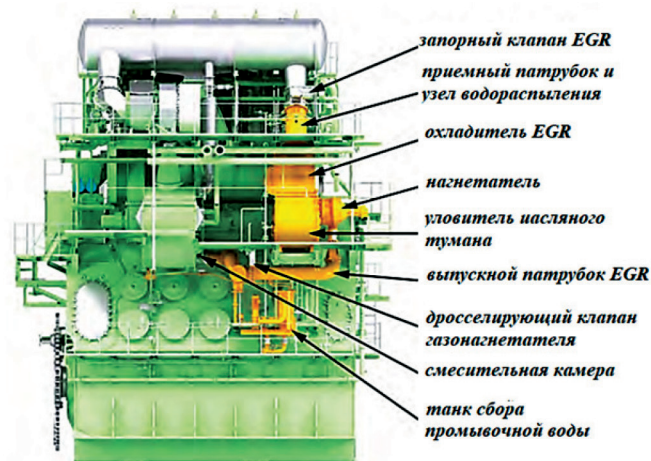


Рис. 4. Конструктивная схема EGR высокого давления

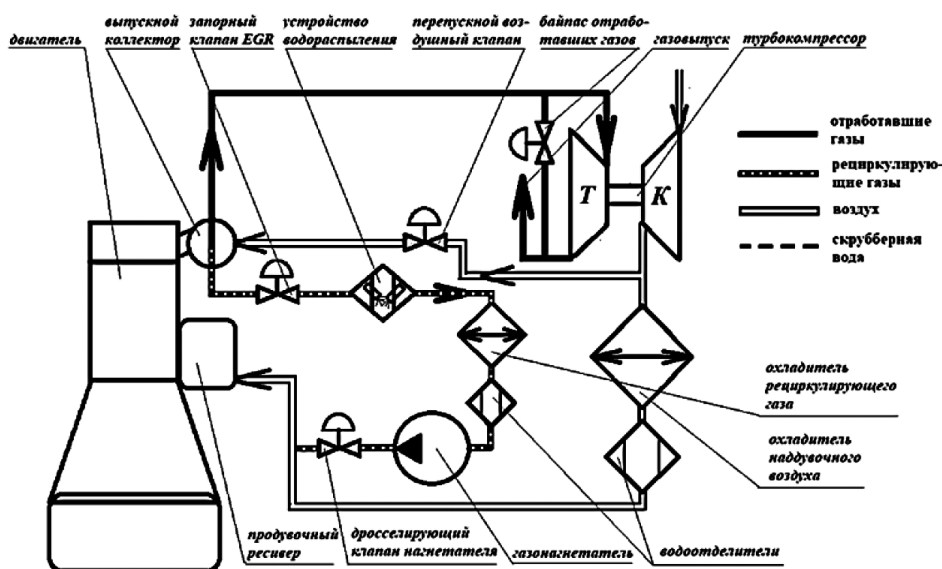


Рис. 5. Схема системы рециркуляции отработавших газов высокого давления MAN B&W

В случае использования нескольких турбокомпрессоров на более крупных двигателях размерного ряда принцип работы системы EGR не изменяется несмотря на отдельные конструктивные отличия. Для работы двигателя в режиме минимизации удельного эффективного расхода топлива доступен режим работы E_{so}EGR, при котором поддерживается максимально увеличенный коэффициент избытка воздуха для обеспечения улучшенных условий протекания внутрицилиндровых процессов смесеобразования и тепловыделения. Особенности управления клапанами системы для различных режимов указаны в табл. 2.

Таблица 2

Состояние управляющих клапанов системы EGR для различных режимов

Режим EGR						
	Tier II			Tier III		
Режим, мощность, %	Запорный клапан и дросселирующий клапан нагнетателя EGR	Перепускной воздушный клапан	Байпас отработавших газов	Запорный клапан и дросселирующий клапан нагнетателя EGR	Перепускной воздушный клапан	Байпас отработавших газов
100	Закрыты	Закрыт	Открыт	Открыты	Открыт	Закрыт
75			Частично открыт			
50					Закрыт	
25						
Режим Eco EGR						
100	Открыты	Закрыт	Открыт	Открыты	Открыт	Закрыт
75			Закрыт			
50					Закрыт	
25						

В обычном режиме работы двигателя для обеспечения стандарта уровня Tier II линия рециркуляции отработавших газов отключена закрытием запорного клапана и дросселирующего клапана нагнетателя EGR. В этом режиме соответствие требованию стандарта достигается регулировками двигателя, при этом клапан байпаса отработавших газов полностью открыт при высоких нагрузках двигателя и частично открывается на малых нагрузках для балансировки турбокомпрессора. Для обеспечения соответствия стандарта уровня Tier III линия рециркуляции активируется открытием запорного клапана EGR и дросселирующего клапана нагнетателя рециркулирующих газов. Рециркулирующий газ направляется в устройство водораспыления и далее в точку смешения с воздухом к продувочному ресиверу. Байпас перепуска воздуха открыт при больших нагрузках на двигатель перепускным воздушным клапаном, а байпас отработавших газов закрыт, что позволяет увеличивать давление продувочного воздуха.

Система EGR работает постоянно, вне зависимости от района плавания. Скорость рециркуляции адаптируется к предельным значениям выбросов NO_x для соответствующего региона. Благодаря оптимизации регулировок двигателя по параметрам рабочего процесса обеспечивается сокращение удельного эффективного расхода топлива около 2,5 % для режима поддержания Tier II и 1,0 % — для Tier III. При переходе двигателя в режим работы EGR ограничения по стандарту Tier II обеспечиваются при включенной линии рециркуляции отработавших газов, клапаны на линии рециркуляции открыты, поддерживая низкий коэффициент рециркуляции в пределах 10–15 %. Для соблюдения требований стандарта Tier III коэффициент рециркуляции отработавших газов увеличивается до 25–45 %, при этом управляющие клапаны системы работают идентично ранее рассмотренному обычному режиму: запорный клапан EGR и дросселирующий клапан нагнетателя открыты, также в открытом состоянии находится перепускной воздушный клапан (за исключением режимов малых нагрузок), перепускной клапан отработавших газов закрыт.

Удельный эффективный расход топлива двигателя с системой EGR, работающего в режиме Tier II, аналогичен расходу базового двигателя (без системы EGR) с соответствующими настройками рабочего процесса. Когда двигатель с рециркуляцией отработавших газов работает в режиме Tier III, удельный эффективный расход топлива будет увеличен по сравнению с режимом Tier II, как показано на рис. 6, ввиду особенностей процесса тепловыделения при сгорании топлива в среде, обедненной кислородом и содержащей газы, обладающие высокой теплоемкостью.

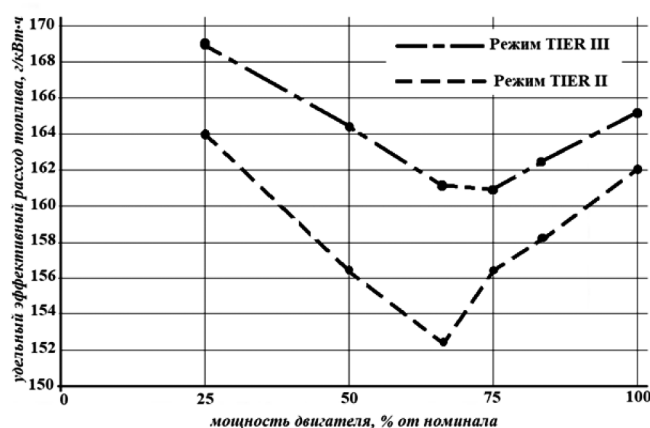


Рис. 6. Сравнение характеристик двигателя с EGR для различных режимов работы

Концепция Eсо EGR обеспечивает снижение расхода топлива за счет оптимизации удельного эффективного расхода топлива как в режиме Tier II (рис. 7, а), так и в режиме Tier III (рис. 7, б). По сравнению с двигателем с EGR двигатель с Eсо EGR обеспечивает снижение удельного эффективного расхода топлива по характеристике в среднем на 2–4 г/кВт · ч и на 0–3 г/кВт · ч для режимов Tier II и Tier III соответственно.

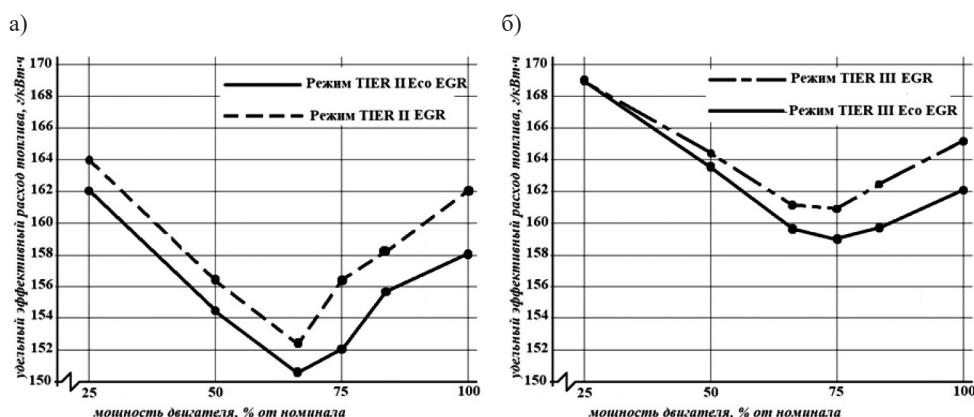


Рис. 7. Сопоставление характеристик двигателя с EGR и Eсо EGR

Таким образом, системы EGR, вне зависимости от схемы компоновки, при коэффициенте рециркуляции более 30 % гарантированно поддерживают требования экологических стандартов по выбросам оксидов азота при работе в зонах контроля (Tier III) при неизбежном (менее 4 %) ухудшении топливной экономичности энергетической установки, обеспечивая минимум эксплуатационных затрат.

Выводы (Summary)

В результате проведенного исследования можно сделать следующие выводы:

1. Постоянное ужесточение требований стандартов экологической безопасности судовых двигателей внутреннего сгорания побуждает производителей к постоянному поиску новых решений, направленных на снижение суммарных выбросов вредных компонентов с отработавшими газами.
2. Важнейшим направлением обеспечения экологической безопасности судовых ДВС является ограничение выбросов оксидов азота как основного компонента суммарной эмиссии вредных веществ.
3. В настоящее время разрабатывается большое количество технологий по борьбе с выбросами NO_x , однако добиться полного соответствия действующим стандартам экологической безопасности

гарантированно позволяют только системы рециркуляции отработавших газов и системы каталитического восстановления.

4. Технологии рециркуляции отработавших газов, по сравнению с распространенной технологией селективного каталитического восстановления оксидов азота, имеют ряд преимуществ, среди которых низкие эксплуатационные затраты (практическое отсутствие расхода реагентов), отсутствие отдельных требований к используемому топливу (для SCR предъявляются особые условия использования сернистых топлив), компактность — система не занимает дополнительных объемов машинного отделения. При этом системы рециркуляции своей работой снижают эффективность двигателя и потенциально способны оказать негативное влияние на его ресурсные показатели, для EGR устанавливаются особые требования к хранению производимого шлама.

5. Системы EGR высокого давления обладают высокой привлекательностью и имеют наименьшие габариты по сравнению с системами EGR низкого давления, реализуя быстрый отклик на изменение условий работы, но при этом усложняют конструктивные элементы процессов обработки рециркулирующего газа и снижают работоспособность газов перед турбиной.

6. Как показывают исследования MAN B&W, системы EGR обладают определенным потенциалом в плане минимизации ущербов, наносимых параметрам и конструкции двигателя. Так, реализация концепции Eсо EGR позволяет достичь некоторой компенсации потерь топливной экономичности двигателя с системой EGR, вызванной опосредованным влиянием на процессы тепловыделения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. 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.
2. Петров А. П. Технологии достижения новых требований по выбросам оксидов азота судовыми энергетическими установками / А. П. Петров, Г. Е. Живлюк // Труды Крыловского государственного научного центра. — 2021. — № S1. — С. 83–85. DOI: 10.24937/2542-2324-2021-1-S-1-83-85.
3. Вибе И. И. Новое о рабочем цикле двигателей / И. И. Вибе. — М.: Машгиз, 1962. — 173 с.
4. Лашко В. А. Образование выбросов отработавших газов и управление процессом сгорания в поршневом двигателе / В. А. Лашко, И. Ю. Привальцев // Ученые заметки ТОГУ. — 2014. — Т. 5. — № 1. — С. 324–337.
5. Зельдович Я. Б. Окисление азота при горении / Я. Б. Зельдович, П. Я. Садовников, Д. А. Франк-Каменецкий. — М.: Изд-во АН СССР, 1947. — 145 с.
6. Зельдович Я. Б. Математическая теория горения и взрыва / Я. Б. Зельдович, Г. И. Баренблатт, В. Б. Либрович, Г. М. Махвиладзе. — М.: Наука, 1980. — 479 с.
7. Fenimore C. P. Formation of nitric oxide in premixed hydrocarbon flames / C. P. Fenimore // Symposium (international) on combustion. — Elsevier, 1971. — Vol. 13. — Is. 1. — Pp. 373–380. DOI: 10.1016/S0082-0784(71)80040-1.
8. Семенов Н. Н. Тепловая теория горения и взрыва / Н. Н. Семенов // Успехи физических наук. — 1940. — Т. 24. — Вып. 4. — С. 433–486. DOI: 10.3367/UFNr.0024.194008a.0433.
9. Варнатц Ю. Горение. Физические и химические аспекты, моделирование, эксперименты, образование загрязняющих веществ / Ю. Варнатц, У. Маас, Р. Диббл. — М.: ФИЗМАТ-ЛИТ, 2003. — 352 с.
10. Шаулов Ю. Х. Горение в жидкостных ракетных двигателях / Ю. Х. Шаулов, М. О. Лернер. — М.: Оборонгиз, 1961. — 195 с.
11. Гришанов П. А. Физико-химические процессы образования окислов азота в дизельном двигателе (обзор состояния вопроса) / П. А. Гришанов // Символ науки. — 2023. — № 5–2. — С. 27–33.
12. Мельник Г. В. Технологии для достижения требований ИМО Tier III (по материалам конгресса СИМАК) / Г. В. Мельник // Двигателестроение. — 2020. — № 4 (282). — С. 41–57.
13. 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.

14. Emission project guide. MAN B&W Two-stroke Marine Engines. — Copenhagen SV, Denmark: MAN Energy Solutions, 2019. — 110 p.

REFERENCES

1. 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.
2. Petrov, A. P., and G. E. Zhivlyuk. "Technologies for achieving new requirements for emissions of nitrogen oxides by marine power plants." *Transactions of the Krylov state research centre* S1 (2021): 83–85. DOI: 10.24937/2542-2324-2021-1-S-I-83-85.
3. Vibe, I. I. *Novoe o rabochem tsikle dvigatelei*. M.: izd-vo MASHGIZ, 1962.
4. Lashko, V. A., and I. Y. Privaltsev. "Education exhaust emissions and control process combustion piston engine." *Scientists notes PNU* 5.1 (2014): 324–337.
5. Zel'dovich, Ya. B., P. Ya. Sadovnikov, and D. A. Frank-Kamenetskii. *Okislenie azota pri gorenii*. M.: Izd-vo AN SSSR, 1947.
6. Zel'dovich, Ya. B., G. I. Barenblatt, V. B. Librovich, and G. M. Makhviladze. *Matematicheskaya teoriya goreniya i vzryva*. M.: Nauka, 1980.
7. Fenimore, Charles P. "Formation of nitric oxide in premixed hydrocarbon flames." *Symposium (international) on combustion*. Vol. 13. No. 1. Elsevier, 1971. 373–380. DOI: 10.1016/S0082-0784(71)80040-1.
8. Semenov, N. N. "Teplovaya teoriya goreniya i vzryva." *Uspekhi fizicheskikh nauk* 24.4 (1940): 433–486. DOI: 10.3367/UFNr.0024.194008a.0433
9. Warnatz, J., Ulrich Maas, and Robert W. Dibble. *Combustion: Physical and Chemical Fundamentals, Modeling and Simulation, Experiments, Pollutant Formation*. 4th edition. Springer, 2006.
10. Shaulov, Yu. Kh., and M. O. Lerner. *Gorenie v zhidkostnykh raketnykh dvigatelyakh*. M.: Gos.nauch.-tekhn. izd-vo OBORONGIZ, 1961.
11. Grishanov, P. A. "Fiziko-khimicheskie protsessy obrazovaniya okislov azota v dizel'nom dvigatele (obzor sostoyaniya voprosa)." *Simvol nauki: mezhdunarodnyi nauchnyi zhurnal* 5–2 (2023): 27–33.
12. Mel'nik, G. V. "Tekhnologii dlya dostizheniya trebovaniy IMO Tier III (po materialam kongressa CIMAK)." *Dvigatelsestroenie* 4(282) (2020): 41–57.
13. Zhivljuk, Grigorij E., and Aleksandr P. Petrov. "Features of the development of environmentally safe modern diesel power plants." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 9.3 (2017): 581–596. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-3-581-596.
14. Emission project guide. MAN B&W Two-stroke Marine Engines. Copenhagen SV, Denmark: MAN Energy Solutions, 2019.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

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

Статья поступила в редакцию 28 июля 2023 г.
Received: July 28, 2023.