



# ПРИМЕНЕНИЕ РЕЦИРКУЛЯЦИИ ОТРАБОТАВШИХ ГАЗОВ ДЛЯ УЛУЧШЕНИЯ ТЕПЛОВЫХ И ЭКОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ДВИГАТЕЛЕЙ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ

УДК 621.444:629.5.03-8

## **АНДРЕЕВ Артем Андреевич**

канд. техн. наук, доцент кафедры теплотехники, Национальный университет кораблестроения, Херсонский филиал, Украина

## **ПИРИСУНЬКО Максим Андреевич**

аспирант кафедры судового машиностроения и энергетики, Национальный университет кораблестроения, Херсонский филиал, Украина.

## **СВИРИДОВ Вячеслав Иванович**

канд. техн. наук, доцент кафедры судового машиностроения и энергетики, Национальный университет кораблестроения, Херсонский филиал, Украина.

### **ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ**

Влияние вредных выбросов судовых дизелей на глобальное экологическое состояние воздушного бассейна ограничено и оценивается в 5-7 % от общего количества выбросов вредных веществ стационарными энергетическими установками и сухопутными транспортными средствами. Однако из-за относительно большой агрегатной мощности судовые дизели могут быть основными источниками загрязнения атмосферы в таких локальных зонах как порты, водные акватории рек, особенно на территории городов. Выбросы вредных веществ в атмосферу с отработавшими газами (ОГ) судовых дизелей являются одним из главных загрязнителей воздушного бассейна, прилегающего к судоходным акваториям рек. При этом основное внимание специалистов, занимающихся проблемами повышения экологической безопасности судовых дизелей, направленно на вопросы, касающиеся очистки ОГ дизелей от оксидов азота NOx. Решение проблемы токсичности ОГ судовых двигателей регламентируется требованиями Международной Морской Организации (ИМО).

Ухудшение экологии воздушной среды, которое наблюдается в настоящее время, приводит к необходимо-

сти усиления норм на токсичные выбросы, прежде всего от транспортных средств, среди которых существенное место занимают судовые энергоустановки и, в первую очередь, судовые двигатели внутреннего сгорания (ДВС).

Решение проблемы загрязнения воздушного бассейна Мирового океана выбросами вредных веществ, в том числе оксидами азота NOx с ОГ судовых дизелей связано, прежде всего, с созданием высокоэффективных технологий снижения концентрации NOx на выпуске из дизельной установки, и это в полной мере относится как к судам, которые проектируются и строятся, так и к судам, находящимся в эксплуатации.

### **АНАЛИЗ ПОСЛЕДНИХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ПУБЛИКАЦИЙ**

Если принять за 100 % весь экологический ущерб, наносимый эксплуатацией транспортных судов, то ущерб от отдельных составляющих распределяется таким образом (рис. 1): от загрязнения морской среды и биосферы вредными и токсичными веществами – 40 %; от вибрации и шума оборудования и корпуса судна – 22 %; от коррозии оборудования и корпуса – 18 %; от ненадежности двигателей – 15 %; от ухудшения здоровья экипажа – 5 % [11].

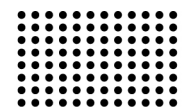
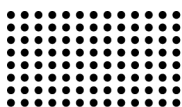


Рис 1. Экологический ущерб, наносимый эксплуатацией судов

Экологическая обстановка в морских и речных акваториях во многом зависит от количества выбросов вредных и токсичных веществ судовых главных установок и вспомогательных дизель-генераторов [12, 13].

#### ФОРМУЛИРОВКА ЦЕЛИ ИССЛЕДОВАНИЯ

Целью данного исследования является анализ возможных схем реализации метода рециркуляции ОГ двигателей внутреннего сгорания с целью улучшения их экологических показателей, а также обоснование диапазона рациональных параметров процессов, происходящих в этих системах.

#### ИЗЛОЖЕНИЕ ОСНОВНОГО МАТЕРИАЛА ИССЛЕДОВАНИЯ

Судовой двигатель, вырабатывая механическую энергию, осуществляет непрерывный теплообмен с атмосферой. Двигатель всасывает воздух и потребляет топливо, а затем выбрасывает ОГ, состоящие из части воздуха и продуктов сгорания топлива. Таким образом, воздух, поступающий в цилиндр двигателя, совершает определенный термодинамический цикл, претерпевая при этом химические изменения, в результате чего превращается в сложную газовую смесь с множеством компонентов.

Причина образования в ОГ вредных и токсичных веществ – процесс сгорания топлива. Характерной особенностью дизельных двигателей является периодическое

горение предварительно перемешанных топлива и воздуха. Указанное обстоятельство обуславливает наличие гомофазного и диффузионного типов горения: первый определяется сгоранием топливозвоздушной смеси, образовавшейся за период задержки воспламенения, второй – сгоранием остального количества топлива в диффузионном фронте пламени.

Экологические характеристики дизельных двигателей определяются главным образом содержанием в продуктах сгорания оксидов азота  $\text{NO}_x$ , которые по индексу токсичности значительно превосходят другие вредные компоненты ОГ.

Согласно Приложению VI Международной Конвенции по предотвращению загрязнения с судов (MARPOL) "Ограничения на выбросы  $\text{NO}_x$ ", с января 2016 г. все новые суда должны будут соответствовать стандартам уровня III, которые предусматривают снижение выбросов на 80 % (рис. 2) по сравнению со стандартами уровня I, для эксплуатации в зонах, обозначенных как зоны контроля выбросов  $\text{NO}_x$  [10].

Продукты сгорания в цилиндре дизелей образуются в основном в результате химических реакций окисления кислородом составляющих элементов топлива и в результате соединения кислорода и азота, которые содержатся в воздухе, с составляющими топлива и продуктами сгорания, которые протекают в течение рабочих процессов "сгорания – расширение". Токсичными элементами в продуктах сгорания дизельного топлива элементарного

состава ( $C + H + S + O = 1$ ) являются: озон ( $O_3$ ), сажа (C), оксид углерода (CO), оксиды азота (NO,  $NO_2$ ), аммиак ( $NH_3$ ), диоксид серы ( $SO_2$ ), сероводород ( $H_2S$ ), сероуглерод

( $CS_2$ ), метин (CN), метил ( $CH_3$ ), формальдегид ( $H_2CO$ ) и бензопирен ( $C_{20}H_{12}$ ) [1, 2].

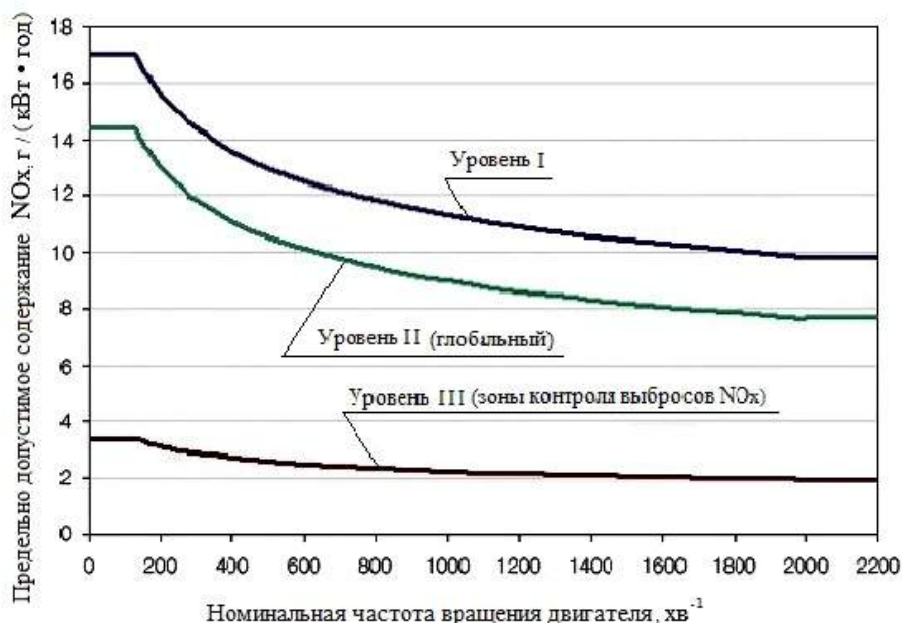


Рис. 2. Ограничения на выбросы NOx в соответствии с требованиями MARPOL

Судовые дизели дают около 7% мировых выбросов NOx и, в связи с этим, регулярно проводятся исследования, связанные с поиском эффективных способов снижения вредных выбросов судовых дизелей в эксплуатационных режимах при одновременном обеспечении низких эксплуатационных расходов. Таким образом, снижение выбросов оксидов азота NOx с ОГ судовых дизелей является одной из наиболее актуальных задач, стоящих перед исследователями в области повышения экологической безопасности судовых энергетических установок.

На большинстве эксплуатационных режимов в форсированных дизельных двигателях температура ОГ, как правило, выше рекомендуемых значений, поэтому более 90% оксидов азота NOx в ОГ приходится на долю NO. Доля NOx в суммарных токсичных выбросах составляет 30-80% по массе и 60-95% по эквивалентной токсичности [8, 14]. Причем токсичность  $NO_2$  в 7 раз выше токсичности NO [15].

Наибольшую опасность оксиды азота представляют в качестве активного компонента смога. Соединяясь с несгоревшими олефиновыми углеводородами, они образуют токсичные нитроолефины, вызывающие заболевания дыхательных путей и нервные расстройства. Причем

токсикологический эффект воздействия NOx на человека примерно в десять раз выше, чем у монооксида углерода CO.

Для судовых дизелей разработаны различные способы снижения концентрации NOx в ОГ. В настоящее время разработанные способы снижения токсичных выбросов с ОГ подразделяются на первичные и вторичные мероприятия. Первичные мероприятия связаны с организацией процессов смесеобразования и сгорания, совершенствованием систем турбонаддува и впрыска топлива, а также использованием альтернативных топлив, таких как природный газ. К вторичным мероприятиям относятся: рециркуляция ОГ, увлажнение рабочей смеси, каталитическая очистка ОГ и др.

Опыт мирового двигателестроения показывает, что для создания дизельного двигателя, удовлетворяющего требованиям IMO Tier II по выбросам NOx, необходимо, прежде всего, организовать рабочие процессы с рациональными значениями удельного эффективного расхода топлива и выбросами токсичных компонентов с ОГ. После реализации первичных мероприятий, дальнейшее улучшение экологических показателей до требований IMO

Tier III следует вести по пути применения вторичных мероприятий.

Большинство мероприятий по сокращению выбросов приводят к увеличению расхода топлива, что само по себе есть большим недостатком. Задача состоит в том, чтобы контролировать выбросы  $\text{NO}_x$ .

Совершенствование эксплуатируемых ДВС является актуальной задачей сегодняшнего дня. Быстрый прогресс и все более жесткие требования IMO требуют все новых, более мощных, экономических и экологических двигателей. В наших исследованиях для решения данных проблем выбрана система рециркуляции ОГ. Целесообразность ее использования объясняется тем, что в ОГ всегда есть такие компоненты, как пары воды и двуокись углерода. Они имеют высокие удельные значения теплоемкости, что приводит к уменьшению температуры пламени внутри камеры сгорания и тем самым снижению количеств образующихся оксидов азота.

Принцип рециркуляции ОГ (в англоязычной литературе обозначается EGR – Exhaust Gas Recirculation) заключается в том, что часть этих газов из выпускного коллектора подается в продувочный ресивер. Разбавление наддувочного воздуха уходящими газами снижает содержание кислорода в воздухе с 21 до 13 %. Это позволяет резко сократить выброс в атмосферу вредных веществ за счет минимального ухудшения энергетической эффективности двигателя.

Как уже отмечалось, снижение  $\text{NO}_x$  методом рециркуляции обусловлено наличием в ОГ диоксида углерода с высокой теплоемкостью, что снижает температуру в камере сгорания. Наряду с этим из-за частичного замещения воздуха ОГ уменьшается концентрация кислорода в зоне горения. В результате чего из-за замедления процесса сгорания снижается максимальный пик температуры. Принципиальная схема системы EGR показана на рис. 3.

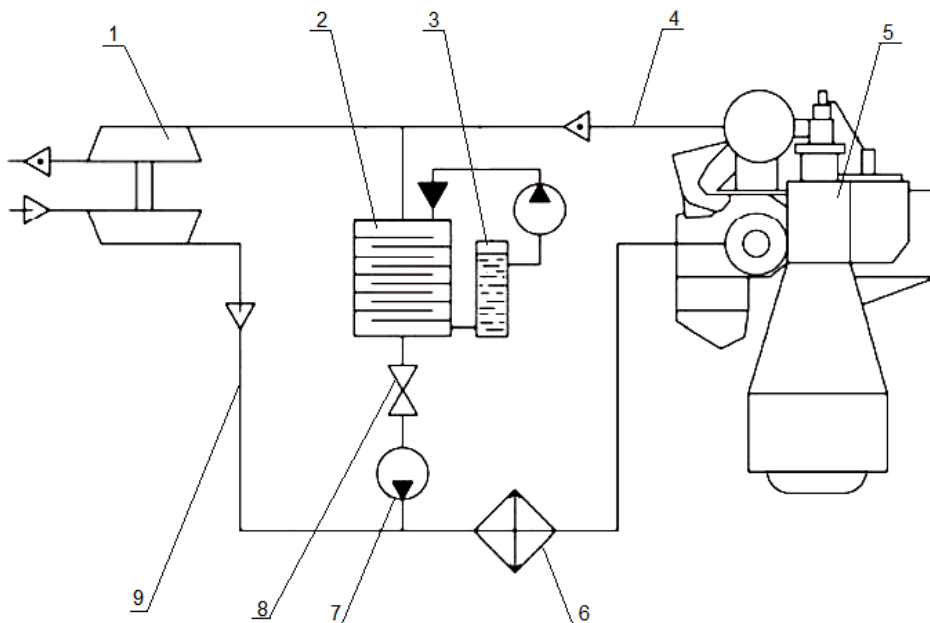
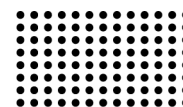
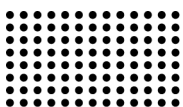


Рис 3. Принципиальная схема рециркуляции отработавших газов (EGR-схема):

1 – газотурбонагнетатель; 2 – водяной скруббер; 3 – водяная цистерна; 4 – газовая магистраль; 5 – ДВС; 6 – охладитель наддувочного воздуха; 7 – насос; 8 – управляющий клапан; 9 – воздушная магистраль

Высоконапорный газотурбонагнетатель прокачивает ОГ через водяной скруббер (газоочиститель) в высоконапорный ресивер продувочного воздуха. Скруббер охлаждает газы, одновременно удаляя  $\text{SO}_x$  и твердые частицы за счет их промывки, прежде чем повторно направить их в камеру сгорания.

В то же время в компании "Kawasaki" обнаружили, что 28 % рециркуляция ОГ обеспечила на 69 % снижение выбросов  $\text{NO}_x$  на двигателе 5S70MC фирмы "MAN" при небольшом повышении выхлопа и расхода топлива [6]. Инженеры фирмы "Wartsila" обнаружили, что 6 % рециркуляция ОГ обеспечила 22 % снижение выбросов  $\text{NO}_x$  на



тестовом малооборотном двигателе 4RTX54 при росте тепловой нагрузки на компоненты двигателя и увеличения температуры ОГ [7].

Специалистами фирмы "Wartsila" разрабатывается механизм внутренней рециркуляции ОГ в двухтактных двигателях как наиболее эффективное средство по снижению выбросов вредных веществ [3, 4, 5]. При снижении высоты продувочных каналов приток продувочного воздуха в цилиндр уменьшается, а следовательно в цилиндре остается больше выхлопных газов для следующего цикла. Снижение продувочных каналов также увеличивает расчетный интервал рабочего хода поршня, что приводит к снижению расхода топлива. Для преодоления повышенного тепловой нагрузки на двигатель со встроенным механизмом рециркуляции ОГ инженеры "Wartsila" разрабатывают методику, которая предусматривает введение воды во время такта сжатия, чтобы довести температуру в камере сгорания до нужной без применения встроенного механизма рециркуляции ОГ. Температура в камере сгорания достаточно высока, чтобы избежать кислотных отложений.

Пропуск части ОГ позволяет изменить химический состав заряда, снизить содержание свободного кислорода в камере сгорания. Исследования показывают, что введение рециркуляции уменьшает выход NOx, но происходит увеличение выхлопа, а также дымности, особенно при больших нагрузках дизеля, близких к номинальным. Удельный расход топлива на номинальном режиме, как правило, превышает значения расхода для дизеля без рециркуляции и с увеличением степени рециркуляции еще более возрастает.

С августа 2008 г. по март 2010 г. фирмой "MAN" была разработана, спроектирована и изготовлена первая система рециркуляции ОГ (EGR) для двухтактных судовых дизелей. Прототип системы рециркуляции ОГ был установлен, и сейчас частично эксплуатируется на судне-контейнеровозе "ALEXANDER MAERSK" (номер IMO: 9164237).

Необходимо иметь в виду, что при слишком большой степени рециркуляции (большой объем ОГ поступает во впускной коллектор, при котором наступает сильный недостаток кислорода) возрастают выбросы углеводородов CH, окиси углерода CO и сажи. Это происходит при сильном нагревании (выше 1300-1800 К) в зонах камеры сгорания.

Согласно исследованиям Разлейцева, при выгорании распыленного жидкого топлива в дизельных двигателях создаются высокие локальные концентрации активных центров цепных реакций – атомов и свободных радикалов, возникающих в результате деструктивных превращений, окисления и распада углеводородов в окрестностях испаряющихся и горящих капель [9]. В этих условиях образование токсичных веществ в дизельных двигателях, таких как NOx, CO и сажа, имеет две основные особенности. Первая заключается в том, что решающую роль в процессе сгорания играет не тепловое, а цепное ускорение реакций за счет высоких локальных концентраций активных частиц. Вторая особенность состоит в том, что процессы их образования тесно связаны конкуренцией в потреблении активных частиц и кислорода. Образование NOx происходит через сложные превращения продуктов реакций топливных радикалов с азотом воздуха в предпламенной и послепламенной зонах. Скорость этих процессов зависит от концентрации азота в объеме цилиндра, скорости сгорания, доли выгоревшего топлива, а также скорости конкурирующих реакций образования продуктов неполного сгорания, в том числе CO и сажевых частиц.

При превышении интенсивности рециркуляции более 20 % резко возрастает содержание углеводородов в ОГ. Одновременно с этим увеличивается выброс твердых частиц (сажи), но в значительно меньшей степени. Поэтому рециркуляция ОГ требует оптимального и точного регулирования с целью ограничения выбросов углеводородов и твердых частиц.

Преимуществом метода рециркуляции ОГ является отсутствие зависимости внешних реагентов, таких, как мочевина или вода. Его определенный недостаток – необходимость использования малосернистого топлива или даже дистиллята во избежание коррозии деталей двигателя. Метод рециркуляции ОГ следует выбирать в качестве средства для выполнения требований IMO Tier III по токсичности ОГ после проведения всестороннего экономического анализа.

В двигателях, работающих на топливе низкого качества, рециркуляция ОГ может привести к засорению и коррозии. Налет, остающейся в результате охлаждения и очистки ОГ на судах, использующих мазут, содержит серу, от которой трудно избавиться.

**ВЫВОДЫ**

Рециркуляция отработавших газов снижает температуру сгорания, тем самым снижая выбросы NOx. Температура сгорания снижается за счет увеличения удельной теплоемкости газов в цилиндре и снижения общей кон-

центрации кислорода. Рециркуляция отработанных газов способствует увеличению продолжительности сгорания и снижению температуры сгорания. Рециркуляция отработанных газов позволяет резко сократить выброс в атмосферу вредных веществ за счет минимального ухудшения энергетической эффективности двигателя.

**ЛИТЕРАТУРА:**

1. Filippov, A.Z. Toksichnost' otrabotavshih gazov teplovyh dvigatelej. [Tekst] / A.Z. Filippov. – K.: Vishha shkola, 1990. – 160 s.
2. Gladkov, S.A., Sozdanie malotoksichnyh dizelej morskikh sudov. [Tekst] / S.A. Gladkov, E.Ju. Lerman. – L.: Sudostroenie, 1990. – 180 s.
3. Vestergren, R. Single-digit NOx Emissions for Cruise Vessels. [Text] / R. Vestergren. – Wartsila NSD Marine News, 1999. (www.wartsila.com)
4. Paro, D. Development of the Sustainable Engine. [Text] / D. Paro. – 23rd CIMAC Congress, 2001.
5. Mikulicic, N. Exhaust Emissions: Next Steps for Low-speed Two-stroke Engines. [Text] / N. Mikulicic. – Wartsila NSD Marine News, 1999. (www.wartsila.com)
6. The Green Diesel. [Text] // Marine Engineering Review. – 1997.
7. Holtbecker, R. Emissions Technology. Sulzer RTA Series. Exhaust Emissions Reduction Technology for Sulzer Marine Diesel Engines. [Text] / R. Holtbecker, M. Geist. – Wartsila NSD, 1998. (www.wartsila.com)
8. Kucenko E.V. Razrabotka metoda oчитki gazov ot oksidov azota s ispol'zovaniem produktov termicheskogo razlozhenija tverdogo karbamida: Diss. na soisk. uchen. step. k.t.n. – M., 2004.
9. Razlejcev N.F. Modelirovanie i optimizacija processa sgoranija v dizeljah. [Tekst] / N.F. Razlejcev. – Har'kov: Vishha shkola, 1980. – 169 s.
10. Exhaust Gas Emission Control Today and Tomorrow. Application on MAN B&W Two-stroke Marine Diesel Engine. – Copenhagen, Denmark. (www.mandieselturbo.com)
11. Klimova, E.V. Metody deskriptivnoj statistiki v analize toksichnyh sostavljajushhijh otrabo-tavshih gazov sudovyh dizelej. [Tekst] / E.V. Klimova // Vestn. Astrahan. gos. tehn. un-ta. Ser.: Morskaja tehnika i tehnologija. – 2010. – № 2. – S. 88-96.
12. Klimova, E.V. Ocenka koncentracii toksichnyh sostavljajushhijh v otrabotavshih gazah sudovyh dizelej i vlijanie konstrukcij kamer sgoranija na ih kolichestvo. [Tekst] / E.V. Klimova // Vestn. Astrahan. gos. tehn. un-ta. Ser.: Morskaja tehnika i tehnologija. – 2009. – № 2. – S. 162-166.
13. Klimova, E.V. Obrazovanie vrednyh veshhestv v vybrosah sudovyh dizelej v processe gorenija toplivovozdushnoj smesi. [Tekst] / E.V. Klimova // Vestn. Astrahan. gos. tehn. un-ta. Ser.: Morskaja tehnika i tehnologija. – 2011. – № 2. – S. 98-104.
14. Smajlis, V.I. Sovremennoe sostojanie i novye problemy jekologii dizelestroenija. [Tekst] / V.I. Smajlis // Dvigatelsestroenie. – 1991. – № 1. – S. 3-6.
15. Markov, V.A. Toksichnost' otrabotavshih gazov dizelej. [Tekst] / V.A. Markov, R.M. Bashirov, I.I. Gabito. – Ufa: Izd-vo Bashkirskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta, 2002. – 376 s.