

А. В. Ерыганов, В. И. Кырнац, Р. О. Брусник, В. С. Глебов, П. А. Гончаренко,
В. И. Холденко

УЛУЧШЕНИЕ ЭКОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ДВУХТАКТНОГО ДИЗЕЛЯ ВО ВРЕМЯ ЭКСПЛУАТАЦИИ

Развитие мирового судоходства происходит в условиях постоянно усиливающихся требований по уменьшению концентраций токсичных продуктов сгорания углеводородных топлив. Пределы концентраций регламентируются в соответствии с приложением VI конвенции MARPOL 73/78. Среди контролируемых компонентов отработанных газов дизеля наиболее опасными для здоровья человека и окружающей среды являются оксиды азота NO_x . Однако уменьшение содержания оксидов NO_x неизбежно связано с ограничениями максимальной температуры цикла, то есть термического коэффициента полезного действия (КПД), а значит и с ухудшением топливной экономичности двигателя. На данный момент с целью уменьшения выбросов оксидов азота крупными транспортными дизелями наиболее широко применяется рециркуляция отработанных газов в воздушный ресивер. Существенным недостатком применения этой схемы является необходимость охлаждения отработанных газов и их дополнительной очистки, что приводит к увеличению массогабаритных характеристик системы и к её удорожанию. Поэтому для её удешевления логичным выглядит сочетание рециркуляции отработанных газов с другими способами уменьшения выбросов оксидов азота. Для уже эксплуатируемых двигателей одним из таких способов выглядит изменение угла впрыска топлива: известно, что чем позже после верхней мёртвой точки (ВМТ) начнётся сгорание топлива, тем ниже по причине падения температуры воздушного заряда будет количество образовавшихся оксидов азота. Расчёт выбросов оксидов азота был смоделирован для главного двигателя MAN-B&W 7S50MC-C, установленного на судне «LILA SHANGHAI». Первоначально модель, созданная с применением пакета AVL-BOOST, была верифицирована, исходя из имеющихся результатов индицирования. После верификации был произведен расчёт выбросов оксидов азота NO_x при вариации угла начала сгорания топлива. Состав газов в ресивере принимался неизменным. По мере сдвига угла начала сгорания топлива дальше от ВМТ наблюдалось ухудшение топливной экономичности и падение цилиндрической мощности при одновременном уменьшении массы выбрасываемых оксидов азота NO_x . Тем не менее, можно сказать, что экологичность двигателя улучшается намного быстрее, чем ухудшаются его мощностно-экономические показатели. Приведенные расчёты показывают, что для находящихся в эксплуатации двигателей изменение угла впрыска топлива позволяет уменьшить выбросы оксидов азота. Поэтому данный подход без особых затруднений можно сочетать с другими методами, удешевляя, таким образом, экологическое совершенствование двигателя.

Ключевые слова: индикаторная диаграмма; рабочий процесс; оксиды азота, требования MARPOL; экологические требования; рециркуляция выхлопных газов; угол опережения впрыска топлива; моделирование рабочего процесса.

Вступление

Развитие мирового судоходства происходит в условиях постоянно усиливающихся требований по уменьшению концентраций токсичных составляющих газообразных продуктов сгорания углеводородных топлив. Пределы концентраций опасных веществ регламентируются в соответствии с приложением VI конвенции MARPOL 73/78 [1]. Продукты сгорания углеводородных топлив, которые выбрасывают дизели, включают следующие составляющие:

- оксиды азота NO_x , которые формируются главным образом из атмосферного азота (содержание регламентируется приложением VI конвенции MARPOL 73/78);
- оксиды серы SO_x , образование которых полностью зависит от содержания серы в топливе (процентное содержание серы в топливе регулируется приложением VI конвенции MARPOL 73/78);
- углекислый газ CO_2 , количество которого прямо пропорционально количеству сожжённого топлива (содержание углерода в топливе не нормируется);

• сажа, частицы золы, монооксид углерода и другие компоненты, присутствующие в выхлопных газах вследствие неполного сгорания топлива.

Среди упомянутых компонентов отработанных газов дизеля наиболее опасными для здоровья человека и окружающей среды являются оксиды азота NO_x . Актуальность работы, таким образом, обусловлена возрастающими требованиями к экологическим характеристикам двигателей. Целью является выработка рекомендаций по уменьшению выбросов оксидов азота NO_x .

Анализ предыдущих исследований

Окисление азота кислородом во время рабочего процесса является неизбежной частью химических реакций, протекающих в цилиндре дизеля. При этом уменьшение содержания оксидов азота неразрывно связано с ограничениями максимальной температуры цикла, то есть термического КПД, а значит и с ухудшением топливной экономичности двигателя. Для соответствия существующим экологическим требованиям производители двигателей и сервисные компании предлагают различ-

ные решения, которые условно можно разделить на две большие группы.

- 1) Оптимизация конструкции дизеля и его систем.
- 2) Уменьшение концентрации токсичных веществ за счёт прямого воздействия на отработанные газы (очистка, химпереработка и т. п.) непосредственно перед их попаданием в атмосферу.

На данном этапе на транспортных дизелях для уменьшения выбросов оксидов азота достаточно часто применяется рециркуляция отработанных газов в продувочный ресивер, что приводит к снижению максимальной температуры горения. При этом для двигателей, находящихся на этапе проектирования, экологические показатели также улучшаются за счёт разработки адаптивных алгоритмов управления рабочим процессом.

Для двигателей, построенных ранее и уже находящихся в эксплуатации, возможно применение технологий впрыскивания в цилиндр водотопливных эмульсий, а также восстановление оксидов азота при помощи водного раствора мочевины (например [2, 3]). Однако на данный момент для крупных транспортных дизелей наиболее широко применяется именно рециркуляция отработанных газов в воздушный ресивер.

Тем не менее, существенным недостатком

применения этой схемы является необходимость охлаждения отработанных газов и их дополнительной очистки. Технические аспекты и возможные препятствия для применения рециркуляции освещены, например, в [4]. Однако, кроме чисто технических проблем, применение рециркуляции отработанных газов приводит к увеличению массогабаритных характеристик силовой установки и к её удорожанию. Поэтому для её удешевления (прежде всего для уже эксплуатируемых двигателей) логичным выглядит сочетание рециркуляции отработанных газов с другими способами уменьшения выбросов оксидов азота. Одним из таких способов является изменение угла впрыска топлива. Известно, что чем позже после ВМТ начнётся сгорание топлива, тем ниже, по причине падения температуры воздушного заряда, будет количество образовавшихся оксидов азота. Принято считать, что при температуре рабочего тела в цилиндре дизеля выше 1850 К концентрация оксидов азота становится недопустимо высокой. В математическом аппарате пакета AVL-BOOST [5] для расчёта концентрации оксидов азота, образующихся при сгорании топлива, использовано исследование [6], в основе которого лежит механизм, предложенный Я. Б. Зельдовичем. Значения величин, используемых для расчёта реакций, приведены в табл. 1.

Таблица 1. Значения величин, используемых для расчёта реакций

Реакция	Расчётное соотношение*	k_{0i} , моль/см ³ /с	a	T_{A_i} , К
$N_2 + O = NO + N$	$R_1 = k_1 \cdot C_{N_2} \cdot C_O$	$4,93 \cdot 10^{13}$	0,0472	38048,1
$O_2 + O = NO + O$	$R_2 = k_2 \cdot C_N \cdot C_{O_2}$	$1,48 \cdot 10^8$	1,5	2859,01
$N + OH = NO + H$	$R_3 = k_3 \cdot C_N \cdot C_{OH}$	$4,22 \cdot 10^{13}$	0,0	0,0
$N_2O + O = 2NO$	$R_4 = k_4 \cdot C_{N_2O} \cdot C_O$	$4,58 \cdot 10^{13}$	0,0	12130,6
$O_2 + N_2 = N_2O + O$	$R_5 = k_5 \cdot C_{N_2} \cdot C_{O_2}$	$2,25 \cdot 10^{10}$	0,825	50569,7
$OH + N_2 = N_2O + H$	$R_6 = k_2 \cdot C_{N_2} \cdot C_{OH}$	$9,14 \cdot 10^7$	1,148	36190,66

$$* k_i = k_{0i} \cdot T^a \cdot \exp(-T_{A_i} / T)$$

в табл. 1 все концентрации реакций R_i имеют размерность [моль/см³/с]; концентрации C_i – молярные концентрации в равновесных условиях с размерностями [моль/см³].

Концентрация оксида N_2O рассчитывается по формуле:

$$C_{N_2O} = 1,1802 \cdot 10^{-6} T^{0,6125} \exp(9471,6/T) C_{N_2} \sqrt{P_{O_2}}, \quad (1)$$

где T – абсолютная температура, К; P_{O_2} – давление кислорода, Па.

Выброс оксидов азота (моль/см³/с) вычисляется с использованием зависимости

$$R_{NO} = 2 \cdot C_{PPM} \cdot C_{KM} \cdot (1 - \alpha^2) \cdot \left(\frac{R_1}{1 + \alpha \cdot AK_2} + \frac{R_4}{1 + AK_4} \right), \quad (2)$$

где $C_{PPM} = 0,64$ – Post Processing Multiplier [5];

$C_{KM} = 1,0$ – Kinetic Multiplier [5];

$$\alpha = C_{NO,act} / C_{NO,equ} / C_{KM};$$

$C_{NO,act}$, $C_{NO,equ}$ – коэффициенты, характеризующие динамику образования оксидов азота в разных зонах;

$$AK_2 = R_1 / (R_2 + R_3);$$

$$AK_4 = R_4 / (R_5 + R_6).$$

В основе расчёта тепловыделения использует-

ся двойная модель Вибье:

$$\frac{dx}{d\varphi} = y^m \cdot (m+1) \cdot \frac{a}{\Delta\varphi_c} \cdot \exp(-\varphi \cdot y^{m+1}), \quad (3)$$

где x – доля сгоревшего топлива; $y = (\varphi - \varphi_0) / \Delta\varphi_c$; φ – угол поворот коленчатого вала (ПКВ); φ_0 – угол начала сгорания топлива (от 1 до 7° ПКВ за ВМТ); $\Delta\varphi_c$ – длительность горения топлива (70° ПКВ); m – параметр модели ($m = 0,21$); a – параметр модели ($a = 6,9$ означает полное сгорание топлива).

Методика проведенных исследований

Расчёт выбросов оксидов азота был смоделирован для главного двигателя MAN-B&W 7S50MC-C, установленного на судне «LILA SHANGHAI». Дизель MAN-B&W 7S50MC-C – двухтактный, реверсивный, с изобарным наддувом используется в судовых пропульсивных комплексах. Основные конструктивные параметры двигателя:

- количество цилиндров – 7;
- диаметр цилиндра $D = 0,5$ м;
- ход поршня $S = 2,0$ м;
- номинальная частота вращения $n = 127$ мин⁻¹;
- номинальная цилиндровая мощность $N_{ec} = 1575$ кВт.

Первоначально модель, созданная с применением пакета AVL-BOOST, была верифицирована по данным индицирования режима, который для данного двигателя составляет большую часть наработки, а именно 50 – 60% от номинальной цилиндровой мощности. На рис.1 приведены результаты модельного расчёта рабочего процесса и индицирования двигателя в реальных условиях плавания.

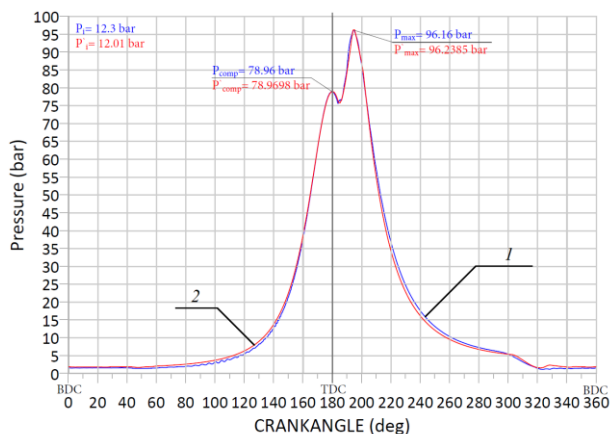


Рис. 1. Диаграмма рабочего процесса одного цилиндра двигателя MAN-B&W 7S50MC-C: 1 – результаты индицирования; 2 – модель AVL Boost

Также при верификации определялись температура в цилиндре и масса образующихся оксидов азота. Результаты приведены на рис. 2 и 3.

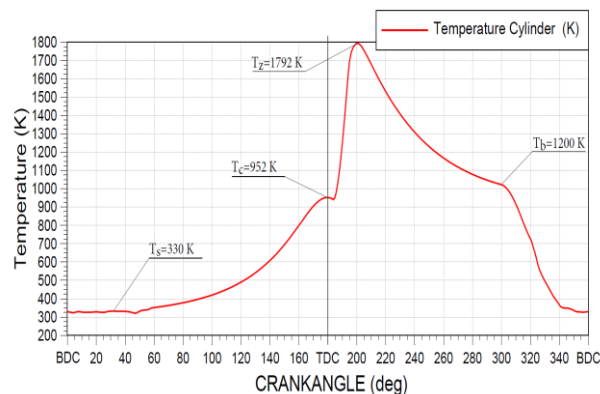


Рис. 2. Изменение температуры в цилиндре двигателя MAN B&W 7S50MC-C (модель AVL Boost)

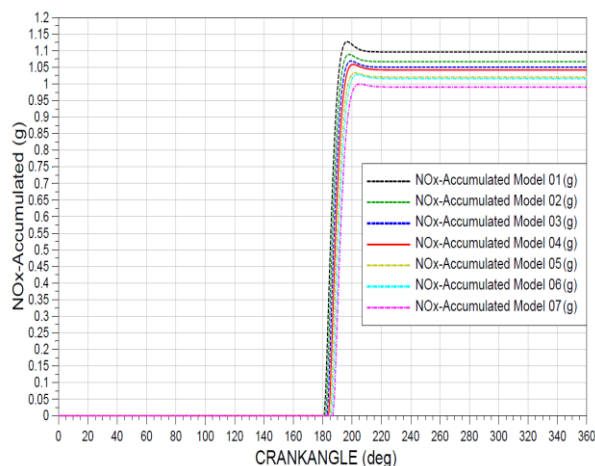


Рис. 3. Формирование оксидов азота NO_x в цилиндре двигателя MAN B&W 7S50MC-C (модель AVL Boost)

На рис. 3 основному эксплуатационному режиму, по которому была произведена верификация, соответствует модель «04», для которой угол начала сгорания топлива составляет 4° ПКВ после ВМТ (также см. табл. 2). При этом рассчитанные выбросы оксидов азота составляют примерно 8,4 г/(кВт·ч).

Затем был произведен расчёт выбросов оксидов азота NO_x при вариации угла начала сгорания топлива на анализируемом режиме. Состав газов в ресивере принимался неизменным.

Видно, что по мере сдвига угла начала сгорания топлива дальше от ВМТ наблюдается ухудшение топливной экономичности и падение цилиндровой мощности при одновременном уменьшении массы выбрасываемых оксидов азота NO_x . Тем не менее, при увеличении угла начала сгорания топлива от 3 до 7° ПКВ после ВМТ, удельный индикаторный расход топлива возрастает на 1,88 г/(кВт·ч) (т. е. на 1,1%), индикаторная цилиндровая мощность падает с 825,3 до 817,73 кВт (на 0,9%) в то

время, как выбросы оксидов NO_x за цикл уменьшаются до 8,0513 г/(кВт·ч) с 8,3855 г/(кВт·ч), т. е. на 4%. Иными словами, можно сказать, что экологичность двигателя улучшается намного быстрее,

чем ухудшаются его мощностно-экономические показатели. Примечательно, что такого результата можно достичь простой регулировкой момента начала подачи топлива.

Таблица 2. Результаты моделирования рабочего процесса при разных углах начала сгорания топлива

Модель AVL	-	01	02	03	04	05	06	07
Угол начала сгорания топлива	$\varphi_{start_combustion}$, °ПКВзаВМТ	1	2	3	4	5	6	7
Максимальное давление сгорания	P_{max} , бар	110,79	104,69	100,56	96,45	91,54	86,97	84,23
Максимальное давление сжатия	P_{comp} , бар	80,41	79,56	79,01	78,96	78,96	78,96	78,96
Среднее индикаторное давление	P_i , бар	11,96	12,02	12,03	12,01	11,98	11,93	11,89
Частота вращения коленчатого вала	n , мин ⁻¹	105,1	105,1	105,1	105,1	105,1	105,1	105,1
Удельный индикаторный расход топлива	$g_i, \text{г}/(\text{кВт}\cdot\text{ч})$	166,82	165,91	165,73	166,21	166,44	167,32	168,09
Цилиндровая мощность	$N_i, \text{кВт}$	822,54	826,67	827,36	825,3	823,92	820,48	817,73
Выбросы NO_x	$z/\text{кВт}\cdot\text{ч}$	8,8465	8,5736	8,4312	8,3855	8,2230	8,2173	8,0513

Выводы

Приведенные расчёты показывают, что для двигателей, уже находящихся в эксплуатации, улучшение экологических характеристик в определённой мере возможно за счёт корректирования угла впрыска топлива. Для дизеля MAN-B&W 7S50MC-C установлено, что при сдвиге впрыска топлива в сторону запаздывания количество выбросов оксидов азота уменьшается намного быстрее (на 4%), чем ухудшаются его мощностно-экономические показатели (определено падение мощности и увеличение расхода топлива примерно на 1%). Это позволяет сделать вывод о том, что корректирование закона топливоподачи может использоваться для удешевления установок по улавливанию токсичных составляющих отработанных газов дизелей. Тем не менее, для выработки более общих рекомендаций в этом направлении необходимо проведение дополнительных модельных и натурных исследований.

Список литературы:

1. International Maritime Organisation. Nitrogen Oxides (NOx) – Regulation 13. URL : [https://www.imo.org/en/OurWork/Environment/Pages/Nitrogen-oxides-\(NOx\)-%E2%80%93-Regulation-13.aspx](https://www.imo.org/en/OurWork/Environment/Pages/Nitrogen-oxides-(NOx)-%E2%80%93-Regulation-13.aspx).
2. MAN Engines, available at: <https://www.engines>

.man.eu/global/en/fascination-and-technology/scr-system/SCR-System.html. 3. Cummins, available at: <https://www.cummins.com/en/in/engines/bsiv-selective-catalytic-reduction-scr>. 4. Herdzik Jerzy Problems of Nitrogen Oxides Emission Decreasing from Marine Diesel Engines to Fulfil the Limit of Tier 3 // Middle Pomeranian scientific society of the environment protection. – 2020. – Vol.21. – P. 659-671, available at: <https://www.researchgate.net/publication/341742135>. 5. AVL Global, available at: <https://www.avl.com/simulation?uj=32114676-39629041&ujName=Cloud%20Computing>. 6. H. G. Pattas K. Stickoxidbildung bei der ottomotorischen Verbrennung. – 1973. – MTZ. – vol. Nr. 12. – P. 397-404.

Bibliography (transliterated):

1. International Maritime Organisation. Nitrogen Oxides (NOx) – Regulation 13. URL : [https://www.imo.org/en/OurWork/Environment/Pages/Nitrogen-oxides-\(NOx\)-%E2%80%93-Regulation-13.aspx](https://www.imo.org/en/OurWork/Environment/Pages/Nitrogen-oxides-(NOx)-%E2%80%93-Regulation-13.aspx). 2. MAN Engines, available at: <https://www.engines>.man.eu/global/en/fascination-and-technology/scr-system/SCR-System.html. 3. Cummins, available at: <https://www.cummins.com/en/in/engines/bsiv-selective-catalytic-reduction-scr>. 4. Herdzik Jerzy (2020). "Problems of Nitrogen Oxides Emission Decreasing from Marine Diesel Engines to Fulfil the Limit of Tier 3". Middle Pomeranian scientific society of the environment protection. Vol.21, pp. 659-671, available at: <https://www.researchgate.net/publication/341742135>. 5. AVL Global, available at: <https://www.avl.com/simulation?uj=32114676-39629041&ujName=Cloud%20Computing>. 6. H. G. Pattas K (1973). "Stickoxidbildung bei der ottomotorischen Verbrennung." MTZ, vol. Nr. 12, pp. 397-404.

Поступила в редакцию 20.06.2022 г.

Ерыганов Алексей Валериевич – канд. техн. наук, доцент кафедры судовых энергетических установок и технической эксплуатации, Одесский национальный морской университет, Одесса, Украина, e-mail: a.yeryganov@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-9736-3662>.

Кырнац Владислав Иванович – канд. техн. наук, доцент кафедры судовых энергетических установок и технической эксплуатации, Одесский национальный морской университет, Одесса, Украина, e-mail: kirnacsvlad@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-8308-7994>.

Брусник Роман Олегович – асистент і аспірант кафедри судових енергетических установок и технической эксплуатации, Одесский национальный морской университет, Одесса, Украина, e-mail: brusnykr@gmail.com.

Глебов Владимир Сергеевич – аспірант кафедри судових енергетических установок и технической эксплуатации, Одесский национальный морской университет, Одесса, Украина, e-mail: 0667381823@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0002-8801-2377>.

Гончаренко Петр Андреевич – аспірант кафедри судових енергетических установок и технической эксплуатации, Одесский национальный морской университет, Одесса, Украина, e-mail: goncharenko.p.a@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-4665-2859>.

Холденко Владимир Иванович – старший преподаватель и аспірант кафедри судових енергетических установок и технической эксплуатации, Одесский национальный морской университет, Одесса, Украина, e-mail: kholdenko188@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0003-0071-7055>.

ПОКРАЩЕННЯ ЕКОЛОГІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ДВОХТАКТНОГО ДИЗЕЛЯ ПІД ЧАС ЕКСПЛУАТАЦІЇ

О.В. Єриганов, В.І. Кирнац, Р.О. Бруснік, В.С. Глебов, П.А. Гончаренко, В.І. Холденко

Розвиток світового судноплавства відбувається за умов вимог, що постійно посилюються, щодо зменшення концентрації токсичних складових газоподібних продуктів згоряння вуглеводневих палив. Межі концентрацій цих речовин регламентуються відповідно з додатком VI Конвенції MARPOL 73/78. Серед контрольованих компонентів відпрацьованих газів дизеля найнебезпечнішими для людей та довкілля є оксиди азоту. Проте зменшення вмісту оксидів азоту неминуче пов'язані з обмеженнями максимальної температури циклу, тобто термічного ККД, отже, і з погіршенням паливної економічності двигуна. На даний момент з метою зменшення викидів оксидів азоту великими транспортними дизелями найширше застосовується рециркуляція відпрацьованих газів у повітряний ресивер. Істотним недоліком застосування цієї схеми є необхідність охолодження відпрацьованих газів та їх додаткового очищення, що призводить до збільшення масогабаритних характеристик системи та її здорожчання. Тому для здешевлення логічним виглядає поєднання рециркуляції відпрацьованих газів з іншими способами зменшення викидів оксидів азоту. Для двигунів, що вже експлуатуються, одним з таких способів виглядає зміна кута впорскування палива: відомо, що чим пізніше після верхньої мертвої точки (ВМТ) почнеться згоряння палива, тим нижче внаслідок падіння температури повітряного заряду буде кількість оксидів азоту, що утворилися. Розрахунок викидів оксидів азоту був змодельований для головного двигуна MAN-B&W 7S50MC-C, встановленого на судні "LILA SHANGHAI". Спочатку модель, створена із застосуванням пакета AVL-BOOST, була верифікована, виходячи з результатів індиціювання. Після верифікації було здійснено розрахунок викидів оксидів азоту NOx при варіації кута початку згоряння палива в номінальному режимі. Склад газів у ресивері приймався незмінним. При зсуві кута початку згоряння палива далі від ВМТ спостерігалось погіршення паливної економічності та падіння циліндрової потужності при одночасному зменшенні маси оксидів азоту NOx, що викидаються. Тим не менш, можна сказати, що екологічність двигуна покращується набагато швидше, ніж погіршуються його потужно-економічні характеристики. Наведені розрахунки показують, що для двигунів, які вже перебувають в експлуатації, зміна кута впорскування палива дозволяє зменшити викиди оксидів азоту. Тому даний підхід без особливих труднощів можна поєднувати з іншими методами, здешевлюючи таким чином екологічне вдосконалення двигуна.

Ключові слова: індикаторна діаграма; робочий процес; оксиди азоту; вимоги МАРПОЛ; екологічні вимоги; рециркуляція вихлопних газів; кут випередження впорскування палива; моделювання робочого процесу.

IMPROVEMENT OF ENVIRONMENTAL PERFORMANCE TWO-STROKE DIESEL DURING OPERATION

O.V. Yeryganov, V.I. Kyrnats, R.O. Brusnik, V.S. Glebov, P.A. Goncharenko, V.I. Holdenko

The development of world shipping is taking place in the context of ever-increasing requirements to reduce the concentrations of toxic components of gaseous combustion products of hydrocarbon fuels. Concentration limits for these substances are regulated in accordance with Appendix VI of the MARPOL 73/78 Convention. Among the controlled components of diesel exhaust gases, nitrogen oxides are the most dangerous for humans and environment. However, a decrease in the content of nitrogen oxides is inevitably associated with limitations on the maximum cycle temperature, that is, thermal efficiency, and hence with a deterioration in the fuel efficiency of the engine. At the moment, in order to reduce emissions of nitrogen oxides by large transport diesel engines, the most widely used is the recirculation of exhaust gases into the air receiver. A significant disadvantage of using this scheme is the need for cooling the exhaust gases and their additional purification, which leads to an increase in the weight and size characteristics of the system and to its rise in price. Therefore, to reduce its cost, it seems logical to combine exhaust gas recirculation with other ways to reduce nitrogen oxide emissions. For engines in operation, one of these methods is to change the angle of fuel injection. It can be assumed that the later the fuel is injected into the cylinder, the lower the temperature of the air charge will be and, accordingly, the lower the maximum combustion temperature, and hence the amount of nitrogen oxides. The calculation of nitrogen oxide emissions was simulated for the main engine MAN-B&W 7S50MC-C installed on the vessel "LILA SHANGHAI". Initially, the model created using the AVL-BOOST package was verified based on the available indexing results. After verification, the calculation of emissions of nitrogen oxides NOx was made with a variation in the angle of the start of fuel combustion at the nominal mode. The composition of the gases in the receiver was taken unchanged. As the fuel combustion start angle shifted further from the TDC, deterioration in fuel efficiency and a drop in cylinder power were observed, while reducing the mass of emitted nitrogen oxides NOx. However, it can be said that the environmental friendliness of an engine improves much faster than its fuel and power characteristics deteriorate. The above calculations show that for engines already in operation, changing the fuel injection angle makes it possible to reduce nitrogen oxide emissions. Therefore, this approach can be combined without much difficulty with other methods, thus reducing the cost of environmental improvement of the engine.

Key words: indicator diagram; working process; nitrogen oxides; MARPOL requirements; environmental requirements; exhaust gas recirculation; fuel injection advance angle; working process modeling.