

УДК 621.444:629.5.03-8

Метод рециркуляції відпрацьованих газів суднових дизелів для зменшення їх токсичності

Р.М. Радченко, М.А. Пирисунько

Національний університет кораблебудування ім. адм. Макарова, м. Миколаїв, 54002, Україна

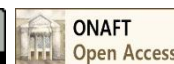
В даний час має місце інтенсивне посилення норм на токсичні викиди відпрацьованих газів суднових дизелів при плаванні суден в прибережних морських районах і на внутрішніх водних шляхах. Постійне зростання числа суден призводить до збільшення об'єму палива, що спалюється ними, а отже до збільшення викидів токсичних компонентів з відпрацьованими газами. В роботі проаналізовано зниження шкідливих викидів судновими дизелями за рахунок методу рециркуляції відпрацьованих газів.

Ключові слова: Оксиди азоту; Рециркуляція; Судновий дизель; Відпрацьовані гази

© The Author(s) 2018. This article is an open access publication

This work is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY)

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



1. Вступ

Велике скупчення суден, що працюють в портах, робота суден в шлюзах і в районах, де діють норми MARPOL 73/78, призводять до утворення великої кількості зон в атмосферному повітрі з підвищеною концентрацією небезпечних токсичних компонентів, що викидаються судновими дизелями з відпрацьованими газами. У таких зонах різко погіршуються екологічні умови, а через обмеженість акваторії неможливо швидко розсіювання токсичних викидів. При підході і відході від портів, суднові дизелі працюють на несталих режимах, викликаних розгоном і гальмуванням судна, що також веде до значних викидів токсичних продуктів з відпрацьованими газами. Склад відпрацьованих газів дизелів представлено в табл. 1.

Таблиця 1- Склад відпрацьованих газів дизелів

Компонент	Одиниця виміру (мил. частка за об'ємом - ppm, %)		
	ppm (млн ⁻¹) 1 млн ⁻¹ = 0.0001%	% за об'ємом	мг/м ³
CO		0,01...0,5	
CH	100...500		
CO ₂		2...12	
NO _x	500...3000	0,05÷0,3	
Бензо(а)пірен C ₂₀ H ₁₂			0...10
Сажа			0...20000
Оксиди сірки			0...0,015
Альдегіди		0,001...0,009	

Вимоги до обмежень викидів NO_x і SO_x, що регламентуються додатком VI конвенції MARPOL, прийняті Міжнародною морською організацією (ІМО). Вони стосуються в першу чергу спеціальних районів з контролю за викидами сірки (Sulfur Emission Control Area - SECA), в яких норми викиду значно знижені (NO_x знижено до 3,4 г/кВт·год, а SO_x до нуля). Площа цих районів збільшується з кожним роком.

При високому вмісті в малорухомій і вологій атмосфері NO₂, O₃, CH виникає туман коричневого кольору, який отримав назву «смог» (smoke - дим). Смог є сумішшю рідких і газоподібних компонентів, він подразнює очі, слизові оболонки і погіршує видимість. Діоксид сірки і оксиди азоту, взаємодіючи з вологою атмосфери, утворюють кислоти, які можуть випадати на землю разом з дощем і наносити велику шкоду навколишньому середовищу.

При згорянні палива в циліндрі дизеля в процесі проходження кінетичних реакцій під впливом високих температур утворюється цілий ряд нових хімічних сполук, в тому числі найбільш токсичних речовин групи оксидів азоту NO_x, які є предметом дослідження.

В умовах експлуатації при певній, нерідко значній, величині зносу деталей циліндро-поршневої групи, елементів паливної апаратури, забрудненості газопилювальних трактів і дефектів систем турбонаддуву, показники викидів NO_x в атмосферу можуть значно перевищувати величини, зазначені в технічних характеристиках дизелів, а, отже, перевищувати встановлені норми по кількості викидів шкідливих речовин.

Враховуючи необхідність більш глибокого очищення відпрацьованих газів актуальною стає задача їх охолодження та фільтрації на науковому, технологічному і конструктивному рівнях.

Вплив NO_x на організм людини характеризується наступними показниками (табл. 2):

Таблиця 2 - Вплив NO_x на організм людини

Об'ємна концентрація в атмосфері, %	Реакція організму людини на NO_x
0,0005	відчуття дискомфорту
0,0013	Подразнення слизових оболонок носа і очей, дихальних шляхів
0,004 - 0,008	Ураження дихальних шляхів, набряк легенів
понад 0,008	Важкі ураження легень аж до летального наслідку

2. Аналіз літературних даних та постановка проблеми

Відповідно до міжнародних стандартів ISO 2710 використовуються наступні характеристики для вимірювання викидів NO_x :

- концентрація викиду C_{Nox} , % (вимірюється технічними засобами);
- швидкість виділення викидів E_{Nox} , г/год (обчислюється);
- питома викид e_{Nox} , г/кВт·год (обчислюється);
- викиди NO_x на 1кг палива ε_{Nox} , г/кг_{пал.} (обчислюється).

Характеристики викидів NO_x зв'язані наступними співвідношеннями:

$$E_{\text{Nox}} = \varepsilon_{\text{Nox}} \cdot G_T, \quad (1)$$

$$e_{\text{Nox}} = E_{\text{Nox}} / N_e; \quad e_{\text{Nox}} = \varepsilon_{\text{Nox}} \cdot g_e, \quad (2)$$

де N_e - ефективна потужність двигуна, кВт;

G_T - витрата палива на двигун, г/кВт·год.

$$C_{\text{Nox}} = k \cdot (E_{\text{Nox}} / G_2) \cdot 100\% = 0,66 \cdot (E_{\text{Nox}} / G_2) \cdot 100\%, \quad (3)$$

де G_2 - масова витрата газів, кг/год;

k - коефіцієнт, що дорівнює відношенню молекулярної маси газів до молекулярної маси NO_x ($\mu_z = 29,3$, $\mu_{\text{Nox}} = 44,4$), тобто

$$k = \mu_z / \mu_{\text{Nox}} = 29,3 / 44,4 = 0,66$$

У підсумку, маємо формули для визначення основних характеристик викидів NO_x [1]:

Викид на 1кг палива (г/кг):

$$\varepsilon_{\text{Nox}} = e_{\text{Nox}} / g_e = C_{\text{Nox}} \cdot G_2 / 0,66 \cdot N_e \cdot g_e \cdot 100\% \quad (4)$$

Швидкість виділення викидів (г/год):

$$E_{\text{Nox}} = C_{\text{Nox}} \cdot G_2 / 0,66 \cdot 100\% \quad (5)$$

Питомий середньозважений викид (г/кВт·год):

$$e_{\text{Nox}} = C_{\text{Nox}} \cdot G_2 / 0,66 \cdot N_e \cdot 100\% \quad (6)$$

Утворення оксидів азоту в камері згоряння дизеля обумовлено наявністю великої кількості азоту в повітрі і паливі, кисню і високими температурами в окремих зонах розшарованого заряду (повітряно-паливної суміші). Під час згоряння палива максимальна середньомасова температура в циліндрі досягає 1500...1800 К, а в зоні згоряння – 2600...2800 К. За таких температур, поряд з кінцевими продуктами зго-

рання палива (CO_2 , H_2O , SO_2), утворюються оксиди азоту. Висока температура процесу згоряння є першим основним енергетичним фактором, що впливає на кінетику утворення оксидів азоту. Другим фактором є тривалість процесу згоряння. Чим більше час перебування частинок незгорілого палива в зоні впливу високих температур, тим більше оксидів азоту формується в газовому середовищі камери згоряння.

В роботі [2] говориться, що концентрація окислів азоту NO_x у відпрацьованих газах експоненціально зростає з моменту початку згоряння (від -10° до 0° ПКВ - повороту колінчастого вала) до максимального значення (ця величина визначається експериментально, але її максимальне значення $C_{\text{Nox}} < 0,15\%$) до закінчення процесу згоряння і в подальшому не змінюється до початку процесу випуску відпрацьованих газів (рис. 1). Що дійсне як для одного циліндра так і для дизеля в цілому. Величина концентрації NO_x дизеля в цілому визначається середнім значенням концентрації по циліндрах.

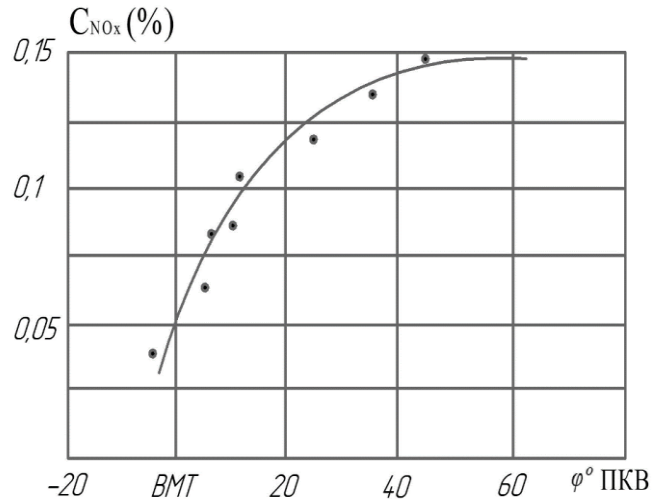


Рисунок 1 – Зміна допустимих концентрацій окислів азоту в відпрацьованих газах в період робочого циклу дизеля в залежності від ПКВ

Зниження токсичності відпрацьованих газів до допустимих значень являє собою складну науково-технічну задачу, при вирішенні якої велике значення має вартість тих чи інших заходів, а також необхідність збереження високих економічних і енергетичних показників дизеля. На даний час є чотири основних методи вирішення даної задачі.

Перший метод - вдосконалення традиційних процесів сумішоутворення і згоряння при одночасній оптимізації управління двигуном.

Другий метод - нейтралізація відпрацьованих газів в системі випуску, при якій токсичні гази (CO , CH , NO_x), що вийшли з циліндрів двигуна, нейтралізуються в системі випуску до викиду їх в атмосферу.

Третій метод - поліпшення якості використовуваних видів палива, зниження вмісту в паливі сірки і аро-

матичних вуглеводнів або перехід до альтернативних видів палива.

Четвертий метод - застосування в якості палив водопаливних емульсій.

Серед найбільш перспективних методів слід відзначити рециркуляцію відпрацьованих газів судових дизелів. До її переваг над іншими методами відноситься несуттєвий вплив на показники роботи двигунів.

Рециркуляція ВГ (від. англ. Exhaust Gas Recirculation (EGR)) - це спосіб значно зменшити утворення NOX в судових дизельних двигунах.

Відомо, що часткова рециркуляція відпрацьованих газів впливає на їх токсичність. Застосування 10% рециркуляції відпрацьованих газів може привести до зниження NOx приблизно на 30% без істотної зміни витрати палива (збільшення до 3 - 4%), хоча концентрація продуктів неповного згоряння (CO, HC) і димність декілька зростають.

Широке застосування рециркуляції відпрацьованих газів дизелів обмежена через існуючі потенційних проблем:

- знос абразивними частинками випускних газів і коксування сажистими частинками камери згоряння, турбонагнітача і проміжного охолоджувача;
- зростання температури повітря, що нагнітається, що призводить до росту NOx;
- підвищена димність, через нестачу кисню для повного згоряння палива;
- корозія через високий вміст сірчистих сполук у

випускних газів.

Парціальний тиск кисню в горючій суміші циліндра падає, але обсяг палива, необхідного для його горіння (отже, місцевого відносини повітря-паливо) залишається постійним.

Таким чином, велика маса газу повинна пройти через фронт полум'я. Цей збільшений масова витрата в результаті рециркуляції веде до більшої маси в зоні горіння. При тому ж обсязі доданого тепла і приблизно при тій же тривалості горіння через наявність більшої кількості залишкових газів в зоні горіння в результаті виходить більш низька температура. Питома теплоємність рециркулюючого вихлопного газу більше, ніж у повітря, так як вміст у вихлопних газах парів води і двоокису вуглецю з більш високими питомими теплоємності, ніж у азоту і кисню повітря. Тому наявність трьохатомних газів і веде до зменшення температури полум'я всередині камери згоряння і до зниження NOx. Крім того, чим менше кисню в камері згоряння, тим менше його з'єднається з азотом, утворюючи NOx.

Для систем рециркуляції фірми MAN Energy Solutions використовуються дві різні схеми [4]:

1. Система з байпасом, сконфігурованим тільки з одним турбонагнітачем, що використовується для двигунів з діаметром циліндра до 700 мм (рис. 2);

2. Система (T/C cut-out) сконфігурована з двома або більше турбонагнітачами і використовується для двигунів діаметром циліндра понад 800 мм.

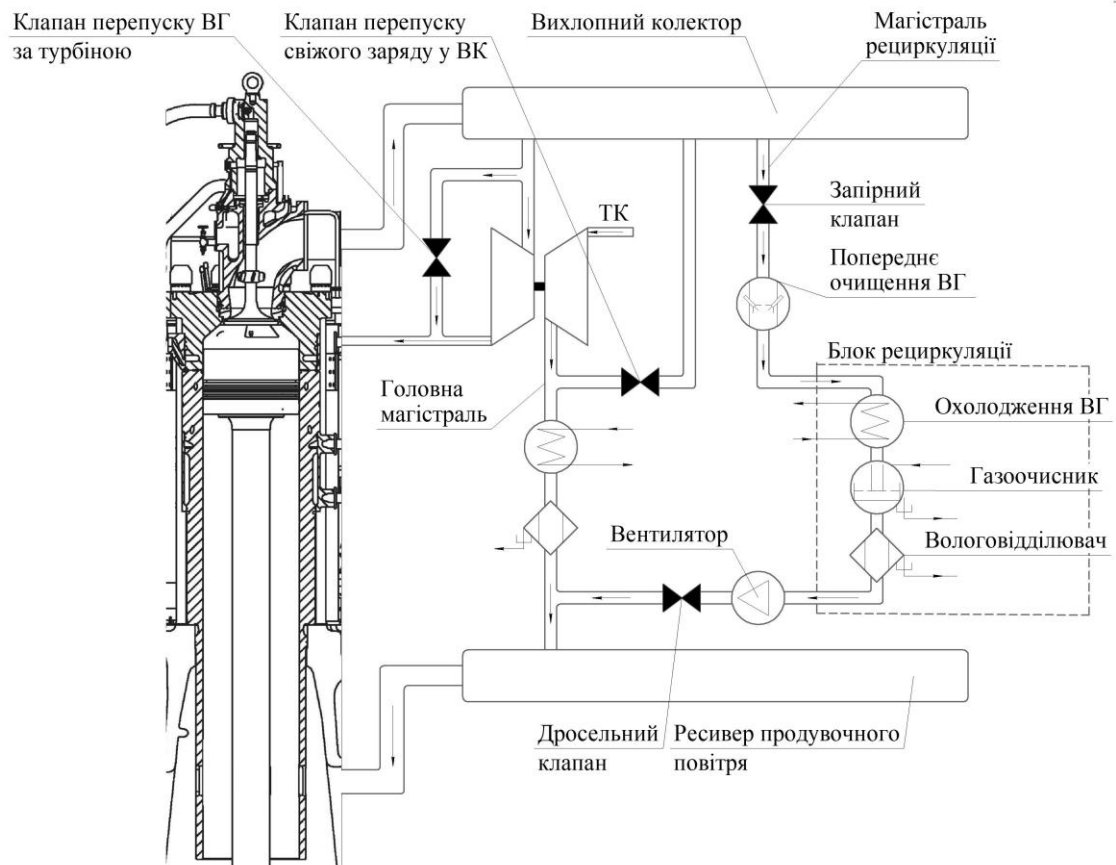


Рисунок 2 - Принципова схема системи з байпасом, що сконфігурована з одним турбонагнітачем

За даними роботи [3] при 20%-ій рециркуляції, зменшення викиду оксидів азоту може досягати 60%. Однак уже при рециркуляції відпрацьованих газів більше 10-15% спостерігається погіршення паливної економічності на 4-7%.

Згідно експериментальних даних випробувань системи рециркуляції відпрацьованих газів (EGR) на двигунах з електронним управлінням фірми MAN B&W при навантаженні 75% та рециркуляції 34% ВГ викиди NO_x складають 3,4 г/(кВт·год) (табл. 3). При більшому відсотку рециркуляції можливе додаткове зменшення викидів NO_x, але спостерігається також значне збільшення питомої витрати палива та CO у складі ВГ.

Таблиця 3 - Результати випробувань системи рециркуляції на режимі Tier III при навантаженні дизеля в 75 %

Позначення	NO _x , г/кВт	dSFOC, г/кВт	CO, г/кВт	P _{max} , бар	EGR, %	O ₂ , %
Tier III	3,4	+0,6	1,34	157	34	16,2
Max. EGR	2,3	+0,4	4,17	151	39	16,0

Інженери фірми "Wartsila" виявили, що 6% рециркуляція відпрацьованих газів забезпечила 22% зниження викидів NO_x на тестовому малообертових двигуні 4RTX54 при зростанні теплового навантаження на компоненти двигуна і збільшення температури вихлопних газів.

У дослідженнях вітчизняних і зарубіжних авторів показано, що при розробці системи рециркуляції відпрацьованих газів необхідно враховувати режими роботи дизеля [5, 6, 7, 8, 9].

рацьованих газів необхідно враховувати режими роботи дизеля [5, 6, 7, 8, 9].

3. Модулювання процесу

Так як кількість викидів оксидів азоту залежить від максимальної температури у циліндрі, був розроблений блок, що доповнює розрахунок індикаторного циклу та враховує рециркуляцію частини відпрацьованих газів назад у циліндри дизеля. Для розрахунків були прийняті параметри, які наведені в таблиці 4.

Таблиця 4 - Вихідні дані для розрахунку

Параметр	Значення
Діаметр циліндра, м	0,6
Хід поршня, м	2,79
Частота обертів колінчастого вала, хв ⁻¹	91
Нижча теплота згоряння умовного палива, кДж/кг	42700

За результатами розрахунків були побудовані залежності температури газів в циліндрі на тактах стиснення та розширення газів на двигуні з системою рециркуляції та без неї (рис. 3). Було зроблено висновок, що за рахунок зменшення концентрації O₂, збільшення концентрації CO₂ у свіжому заряді та, відповідно, збільшення теплоємності, спостерігається зменшення максимальної температури у циліндрі.

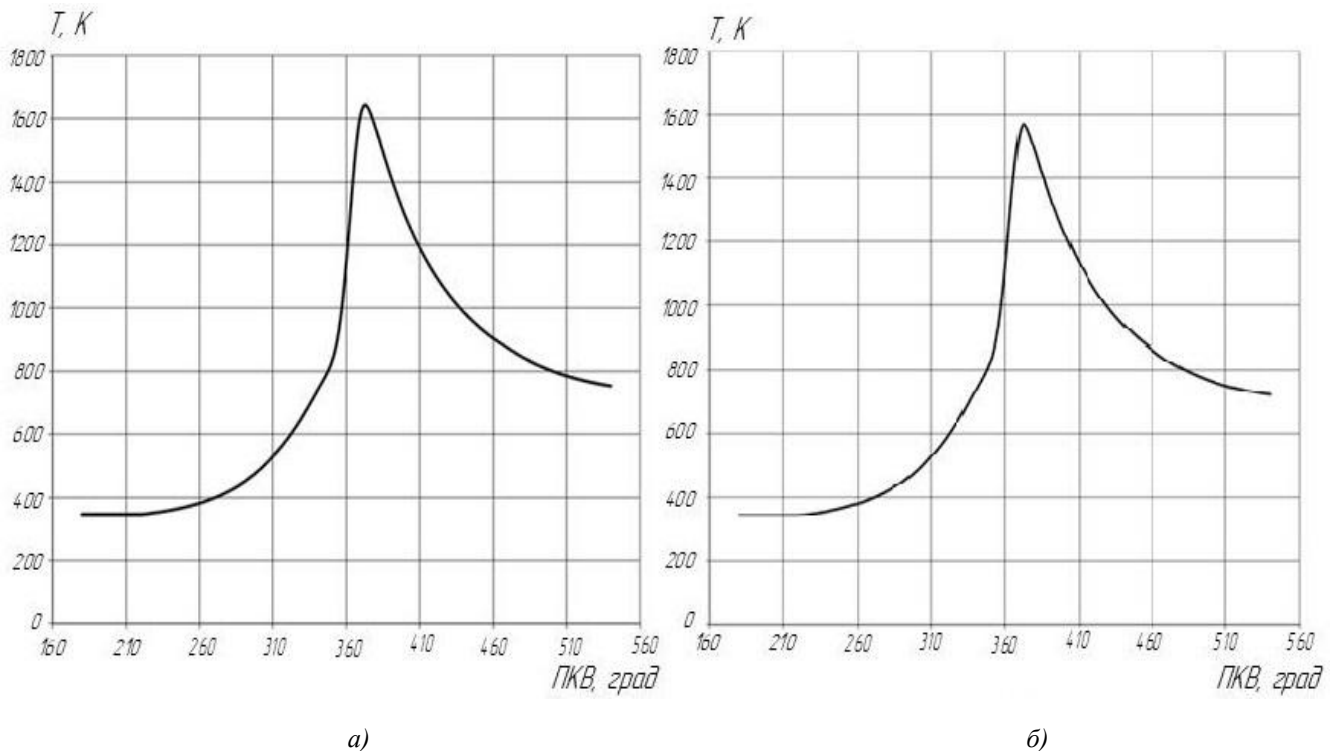


Рисунок 3 - Залежності температури газів в циліндрі на тактах стиснення та розширення газів на двигуні: а) без системи рециркуляції ВГ; б) з системою рециркуляції ВГ

4. Висновки

Метод рециркуляції відпрацьованих газів суднових ДВЗ сприяє зменшенню шкідливих викидів суднових дизелів, насамперед оксидів азоту. До переваг даного методу слід віднести несуттєвий вплив на показники роботи двигунів.

Охолодження рециркулюючих газів призводить до посилення ефекту зниження оксидів азоту і зниження витрати палива в порівнянні з рециркуляцією відпрацьованих газів без їх охолодження.

Література

1. Русинов Р.В. О распыливании топлива в дизелях // Двигателестроение. - 2004. - № 2. - С. 4-6.
2. Звонов В.А., Фурса В.В., Солодовников П.С. Исследования динамики образования токсических веществ в цилиндре дизеля // Сб.: Двигатели внутреннего сгорания. - Вып. 21. - Харьков, 1975. - С. 17-25.
3. Морозов К.А. Токсичность автомобильных двигателей: МАДИ (ТУ)1997. - М - 84с.
4. Turbo, M.D [Електронний ресурс]: Emission Project Guide MAN B&W Two-stroke Marine Engines / MAN B&W. - 2013. - P. 111
5. Новоселов А. Л., Новоселов С. В., Мельберт А. А., Унгефукт А. В, Снижение токсичности автотракторных дизелей; Учебное пособие по целевой подготовке специалистов ДВС / Под ред. А. Л- Новоселова // Алт. гос. техн. ун-т им. И. И. Ползунова.-Барнаул: Б.и., 1998.-122 с.
6. Stefan Gros. Marine emission legislation. / Wartsila Diesel Group. Marine News. -4. -1994. -p.37-43.
7. Exhaust Gas Emission Control Today and Tomorrow Application on MAN B&W Two-stroke Marine Diesel Engine [Електронний ресурс]: Copenhagen, Denmark. - P. 36
8. Reduction of SO₂, NO_x and Particulate Matter from Ships with Diesel Engines Environmental Project [Електронний ресурс]: no. 1510, 2014 - P. 114
9. Климова Е.В. Оценка концентрации токсичных составляющих в отработавших газах судовых дизелей и влияние конструкций камер сгорания на их количество // Вестн. Астрахан. гос. техн. ун-та. Сер.: Морская техника и технология. - 2009. - №2. - С.162-166.
10. Климова Е.В. Образование вредных веществ в выбросах судовых дизелей в процессе горения топливовоздушной смеси. - Вестн. Астрахан. гос. техн. ун-та. Сер.: Морская техника и технология. 2011, №2. - С.98-104.
11. Paro, D., Development of the Sustainable Engine, [Text] / D. Paro. - 23rd CIMAC Congress, 2001.

Отримана в редакції 11.05.2018, прийнята до друку 03.07.2018

Method of recycling exhaust gases of marine diesel engines to reduce their toxicity

R. N. Radchenko, M. A. Pyrysunko

Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolaiv, Ukraine

Intensive work is underway to create power plants with the least harmful emissions into the environment in the global shipbuilding and maritime transport. The types of harmful emissions of ships include diesel exhaust gases, hold water and oil, ballast water, accidental emissions, paint, waste. Among these emissions, the most significant and harmful components are the exhaust gases of the ship's main propulsion systems. Nitrogen oxides are known to be one of the main harmful emissions of diesel engines. They are second only to carbon dioxide CO₂ in mass emissions, and in terms of danger - benzo (a) pyrene, which is practically not contained in the emission of a diesel engine. It is known that NO_x are formed in the zones of the combustion chamber with a high temperature, which takes place in the phase of kinetic and diffusion combustion. The highest temperature occurs in local zones during kinetic combustion, when the probability of occurrence of these zones is the highest. Therefore, with greater rigidity of the process, an increased concentration of nitrogen oxides is observed in the exhaust gases of a diesel engine. Creating a reliable and efficient heat exchanger for cooling recirculating gases is a complex task, because of sediment and pollution emitted by these gases. The presence of a large number of particles in the exhaust gases of diesel engines makes it more difficult to ensure the reliability of the recirculation system due to pollution and deposits. Solid particles entering the cylinder with recirculating gases increase its wear. All this reduces the emission of nitrogen oxides, but the formation of smoke increases and problems arise with the cleaning of parts. The task of reducing its toxicity is urgent, considering the constant increase in requirements for toxic exhaust emissions. Technologies to reduce the output of NO_x with exhaust gases are associated with an increase in the cost of diesel engines and with an increase in maintenance costs in its operation. EGR system is the most convenient and the least harmful way for the reducing NO_x emissions in terms of deterioration of the engine. EGR system has the advantage over other methods, such as compression ratio, water injection and other, because a power characteristic changes fractionally. High specific heat capacity values of components such water vapor and carbon dioxide provides a reduction temperature of fire inside the combustion chamber and reduces the amount of nitrogen oxides.

Keywords: nitrogen oxides, recirculation, diesel engine, exhaust gas.

References

1. **Rusinov R.V.** On fuel atomization in diesel engines // Dvigatolestroyeniye. - 2004. - № 2. - p. 4-6.
2. **Zvonov V.A., Fursa V.V., Solodovnikov P.S.** Studies of the dynamics of the formation of toxic substances in the cylinder of a diesel engine // Coll.: Engines of internal combustion. - Vol. 21. - Kharkiv, 1975. - p. 17-25.
3. **Morozov K.A.** Toxicity of automobile engines: MADI (TU) 1997. - M - p. 84.
4. **Turbo, M.D** [Electronic resource]: Emission Project Guide MAN B&W Two-stroke Marine Engines / MAN B&W. - 2013. - P. 111
5. **Novoselov, A.L., Novoselov, S.V., Melbert, A.A., Ungefukt, A.V.,** Decrease in toxicity of autotractor diesel engines; A manual for the special training of specialists of the internal combustion engine / Ed. A. L-Novoselova // Alt. state tech. un-t them. I.I. Polzunova.-Barnaul: B.I., 1998.-122 p.
6. **Stefan Gros.** Marine emission legislation. / Wartsila Diesel Group. Marine News, 4, 1994, p. 37-43.
7. Exhaust Gas Emission Control Today and Tomorrow Application on MAN B&W Two-stroke Marine Diesel Engine [Electronic resource]: Copenhagen, Denmark, P. 36
8. Reduction of SO₂, NO_x and Particulate Matter from Ships with Diesel Engines Environmental Project [Electronic resource]: no. 1510, 2014 - P. 114
9. **Klimova E.V.** Estimation of the concentration of toxic components in the exhaust gases of ship diesel engines and the influence of the design of the combustion chambers on their number // Vestn. Astrakhan. state tech. un-that. Ser. : Marine technology and technology. - 2009. - №2. - P.162-166.
10. **Klimova E.V.** The formation of harmful substances in the emissions of marine diesel engines in the process of burning the fuel-air mixture. - Vestn. Astra Khan. state tech. un-that. Ser. : Marine technology and technology. 2011, №2. - P.98-104.
11. **Paro, D.,** Development of the Sustainable Engine, [Text] / D. Paro. – 23rd CIMAC Congress, 2001.

Received 11 May 2018

Approved 03 July 2018

Available in Internet 30 August 2018