

ЕНЕРГЕТИКА ТА ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ

УДК 621.444:629.5.03-8

Аналіз способів зменшення шкідливих викидів суднових двигунів рециркуляцією відпрацьованих газів

М. А. Пирисунько

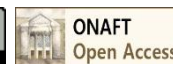
Національний університет кораблебудування ім. адм. Макарова, проспект Героїв України 9, Миколаїв, 54002, Україна

Розвиток судноплавства на водних шляхах призвів до будівництва нового, сучасного флоту з потужними енергетичними установками. Масова експлуатація такого флоту супроводжується інтенсивним зростанням його впливу на навколишнє середовище. Один з найважливіших компонентів суспільного і економічного розвитку, який поглинає значну кількість ресурсів і надає серйозний вплив на природне середовище, є морський транспорт. В роботі проаналізовано можливість зменшення кількості шкідливих викидів судновими ДВЗ за рахунок системи рециркуляції відпрацьованих газів.

Ключові слова: Викиди; 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

Морський транспорт – один з найважливіших компонентів суспільного і економічного розвитку, який поглинає значну кількість ресурсів і надає серйозний вплив на природне середовище. Використання транспорту відіграє важливу роль в економіці і повсякденному житті людей. При всій важливості транспортного комплексу як невід'ємного елемента економіки необхідно враховувати його негативний вплив на природні екологічні системи [1].

Постійне зростання кількості суден і потужності їх двигунів призводить до збільшення об'єму палива, що спалюється ними, а, отже, до збільшення викидів токсичних компонентів з відпрацьованими газами. Все зростає забруднення атмосфери промисловими і транспортними викидами являється однією з найбільш важливих і важко вирішуваних проблем сучасності. [2].

Особлива увага при цьому приділяється морському транспорту, шкідливі викиди якого відіграють значну роль, як в глобальній постановці проблеми, так і в регіональному і локальному забрудненні повітряного басейну [3].

Морські порти є вираженими джерелами забруднення атмосферного повітря твердими і газоподібними речовинами. Винятково важливим показником ступеня впливу шкідливих викидів дизельних установок суден на навколишнє середовище є рівень їх приземних концентрацій в атмосферному повітрі в безпосередній близькості до суднових фарватерів, місцях скупчення суден, портів. Результати багатьох досліджень показують, що вміст в повітряному середовищі оксиду вуглецю, оксидів азоту, оксидів сірки перевищує гранично-допустимі максимально-разові концентрації для атмосферного повітря. Це свідчить про суттєве забруднення повітря морськими судами [4].

Велику роль в забрудненні атмосферного повітря грають дизелі морських суден, які як і раніше залишаються найбільш ефективними в енергетичному сенсі. Так при згорянні 1 кг дизельного палива виділяється 80-100 г токсичних компонентів (20-30 г оксиду вуглецю (II), 20-40 г оксидів азоту, 4-10 г вуглеводнів, 10-30 г оксидів сірки, 0,8-1,0 г альдегідів, 3-5 г сажі). Маючи значно менші, порівняно з бензиновими двигунами, викиди CO і вуглеводнів, відпрацьовані гази дизелів мають досить високу токсичність, через підвищений вміст оксидів азоту, оксидів сірки, сажі і альдегідів.

При роботі суднових енергетичних установок в атмосферу викидаються відпрацьовані гази ГД, токсичність яких визначається сортом палива і умовами його згорання. Застосування важких сірчистих палив сприяє зменшенню експлуатаційних витрат на паливо, але при цьому підвищується забруднення навколишнього середовища сірчистим і сірчанам ангідридом, збільшується знос і число відмов суднових енергетичних установок.

Викид в атмосферу відпрацьованих газів є наслідком і необхідною умовою нормального функціонування двигунів внутрішнього згорання (ДВЗ). Двигун, виробляючи механічну енергію за рахунок окислення палива повітрям, в процесі роботи здійснює тепломасообмін з навколишньою атмосферою. Він забирає повітря і споживає паливо, потім викидає відпрацьовані гази - суміш газоподібних продуктів повного згорання, надлишкового повітря і різних мікродомішок (газоподібних, рідких і твердих частинок).

За своєю природою відпрацьовані гази дизелів являють собою складну багатокомпонентну суміш газів, парів, крапель рідин і дисперсних частинок. Всього відпрацьовані гази ДВЗ містять близько 280 компонентів, частина з яких є нетоксичними. При використанні вуглеводневих палив нафтового походження і атмосферного повітря в якості окислювача відпрацьованих газів

дизельних і котельних установок складаються на 99% з нетоксичних компонентів - продуктів неповного згоряння (діоксид вуглецю і водяна пара H_2O) і повітря зі зниженим вмістом кисню O_2 (табл. 1.) [5]. Шкідливі властивості відпрацьованих газів, наведені в таблиці 1, обумовлені наявністю в їх складі тих чи інших шкідливих компонентів.

Таблиця 1 – Основні шкідливі властивості відпрацьованих газів дизелів

Компонент відпрацьованих газів	Шкідливі властивості
Оксид вуглецю, оксиди азоту, оксиди сірки, вуглеводні, альдегіди	токсичність
Акролеїн, формальдегід, оксиди сірки, вуглеводень	підразнення слизових носа, горла і очей
Бензапірен	канцерогенна дія
Альдегіди, вуглеводні	неприємний запах
Сажа, смоли, мінеральні аерозолі, частки і пари палива і масла	димність

Всі токсичні компоненти, які утворюються в судових дизелях, за своєю природою їх виникнення можна розділити на дві основні групи. До першої групи належать продукти неповного згоряння палива (монооксид вуглецю, вуглеводні, альдегіди, сажа). Токсичні

компоненти другої групи утворюються в результаті повного окислення хімічних елементів, що входять до складу палива і повітря оксиди азоту NO_x та сірки SO_x [6].

Деякі компоненти ВГ судових дизелів володіють сильними токсикологічними властивостями і можуть викликати важкі захворювання людини. Це призводить до необхідності вводити суворі обмеження на їх утримання в ВГ.

На рисунку 1 показана умовна схема негативних екологічних впливів токсичних компонентів відпрацьованих газів судових дизелів [7].

Основним токсичним компонентом відпрацьованих газів дизелів, незалежно від типу, класу, розмірності і конструктивних особливостей, є оксиди азоту NO_x .

Вони утворюються в камері згоряння дизеля шляхом окислення азоту, що міститься в повітрі, а також азоту з азотовмісних молекул палива. Визначальний вплив на емісію NO_x надає температура в камері згоряння. При цьому найбільш інтенсивно утворення оксидів азоту відбувається в першій фазі згоряння до моменту досягнення максимальної температури згоряння. Частка NO_x в сумарних токсичних викидах становить 30-80% по масі і 60-95% по еквівалентній токсичності. Токсичність N_2O в сім разів вище токсичності NO . Близько 42% викидів оксидів азоту в атмосферу припадає на дизелі. Причому сорт палива, що спалюється не робить істотного впливу на утворення оксидів азоту в камері згоряння. З оксидів азоту, що містяться в відпрацьованих газах дизелів, 80-90% припадає на монооксид азоту NO і 10-20% - на діоксид азоту. Зміст

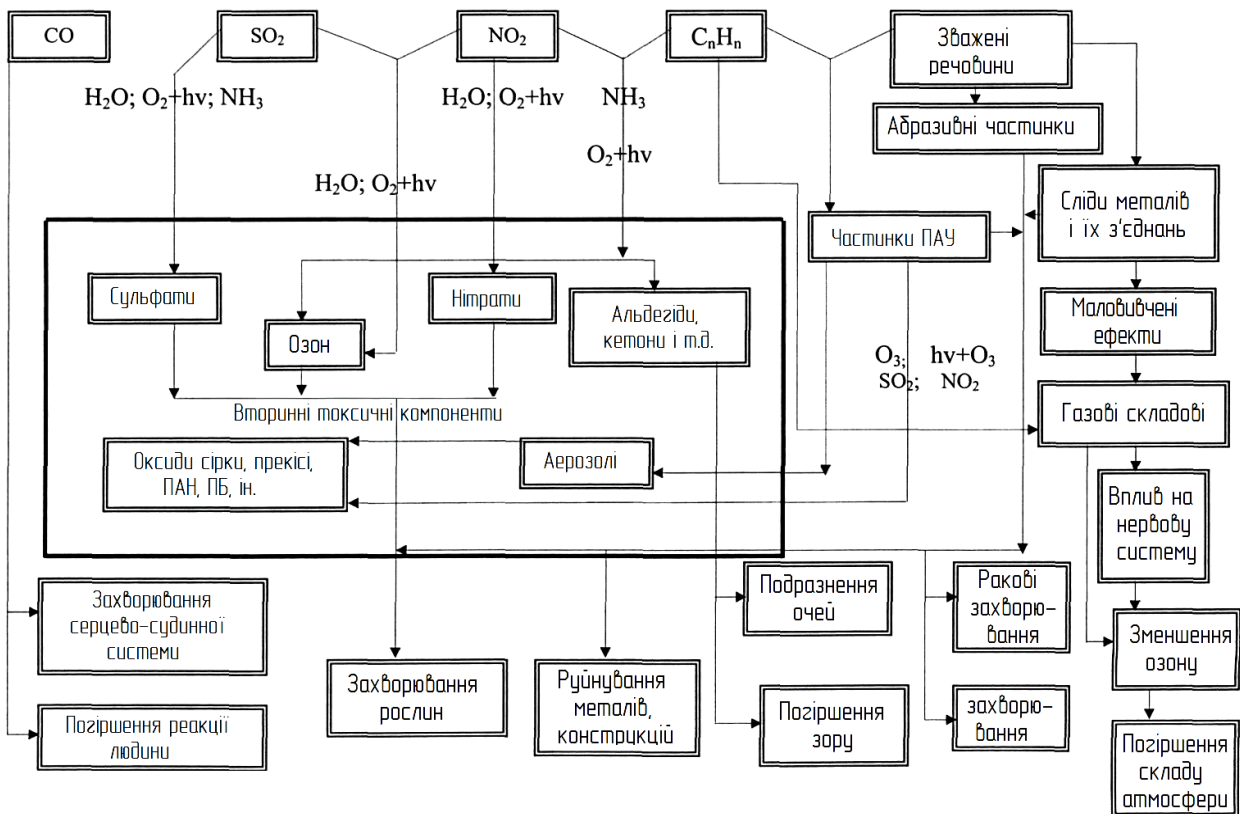


Рисунок 1 – Негативні екологічні впливи токсичних компонентів відпрацьованих газів судових дизелів

інших газоподібних оксидів азоту (N_2O , N_2O_2 , N_2O_4 , N_2O_5) в відпрацьованих газах мізерно малий. Монооксид азоту є нестабільним компонентом. В атмосфері при нормальних умовах монооксид азоту NO окислюється до діоксиду NO_2 протягом від 0,5 до 100 годин, в залежності від концентрації в повітрі.

За ступенем впливу на організм токсичні речовини поділяють на чотири класи: 1 - надзвичайно небезпечні; 2 - високонебезпечні; 3 - помірно небезпечні; 4 - малонебезпечні. До першого класу належить тільки бензапірен. Другий клас включає десять речовин: оксиди азоту, триоксид сірки - аерозоль сірчаної кислоти, бензол, фенантен, фенол, 3 - нафтол, формальдегід, акролеїн, мурашина кислота, фуран. До третього класу належить 33 речовини, до четвертого - 40.

2. Аналіз літературних даних та постановка проблеми

Важливим елементом в системі організаційно-технічних заходів, спрямованих на зменшення шкідливого впливу дизельних установок суден на навколишнє середовище, є формування технічних вимог до кількості, складу і рівню шкідливих викидів з відпрацьованими газами двигунів транспортних засобів [3].

В останнє десятиліття питання охорони навколишнього середовища вийшли в число найважливіших, які необхідно вирішити людству. Через високу токсичність шкідливих компонентів дизелів, їх зміст в ВГ обмежується національними та міждержавними стандартами. Кожна країна або група країн приймають стандарти в залежності від умов навколишнього середовища, специфічних особливостей: економіки, думки різних залучених груп, які захищають свої позиції (економістів, промисловості, науковців) та рішення політиків.

Одностайно, як найбільш небезпечних компонентів ВГ дизелів фахівцями всіх країн приймаються: оксиди азоту, оксиди сірки, окис вуглецю і незгорілі вуглеводні. У зв'язку зі специфічними особливостями судових, тепловозних і промислових дизелів в їх ВГ в більшості країн нормуються тільки викиди оксидів азоту. Але світова громадськість веде активну боротьбу за чистоту навколишнього середовища і тому, в прагненні не забруднювати атмосферу містяться в ВГ агресивними сполуками сірки, в ряді регіонів введені обмеження на вміст сірки в пальному, використовуваних не тільки на березі, а й на судах.

Рішення проблеми забруднення повітряного басейну Світового океану викидами шкідливих речовин, в тому числі оксидами азоту NO_x з ВГ судових дизелів пов'язано, перш за все, зі створенням високоефективних технологій зниження концентрації NO_x на випуску з дизельної установки, і це повною мірою відноситься як до суден, які проектується і будуються, так і до суден, що знаходяться в експлуатації.

Якщо прийняти за 100% весь екологічний збиток, заподіяний експлуатацією транспортних суден, то збиток від окремих складових розподіляється таким чином: від забруднення морського середовища і біосфери токсичними речовинами - 40%; від вібрації і шуму обладнання і корпусу судна - 22%; від корозії обладнання та корпусу - 18%; від ненадійності двигунів - 15%; від погіршення здоров'я екіпажу - 5%.

Законодавчим органом для нормування екологічних показників судових ДВС є Міжнародна Морська Організація (ІМО). Розроблені нею і діючі з 1 січня 2011 року технічні норми ІМО Tier-2 стосуються тільки викидів оксидів азоту. З 2016 року введено новий стандарт ІМО Tier-3, в якому гранично допустимий вміст NO_x у відпрацьованих газах знижено майже в 4 рази. Більш наглядно зміну вимог до концентрації оксидів азоту показано на рис. 2. Інакше кажучи, з 2016 р судові двигуни повинні забезпечувати ті ж показники по викидах NO_x , що і автомобільні дизелі. Таке різке посилення нормативів на викиди забруднюючих атмосферу речовин змушує виробників постійно вишукувати все нові і нові технічні рішення, які покращують екологічні показники дизелів. У теперішній час склалася ситуація, коли розвиток сучасних ДВС і їх конкурентоспроможність визначаються головним чином наявністю засобів, що дозволяють знизити викиди шкідливих речовин до рівня відповідних екологічних вимог.

Сучасні вимоги щодо обмеження викидів NO_x і SO_x регулюються положенням VI Конвенції МАРПОЛ, прийнятої Міжнародною морською організацією (ІМО). Вони стосуються спеціальних районів контролю за викидами (Emission Control Area – ECA), та спеціальних районів контролю за викидами сірки (Sulfur Emission Control Area - SECA), в яких норми викидів значно знижені (NO_x до 3,4 г/кВт*годину, SO_x до нуля), а кількість таких районів зростає з кожним роком.

В зонах контролю за викидами можуть обмежуватись викиди SO_x , РМ або NO_x , або всіх трьох видів викидів із суден, за умови пропозиції Сторони до Додатка VI.

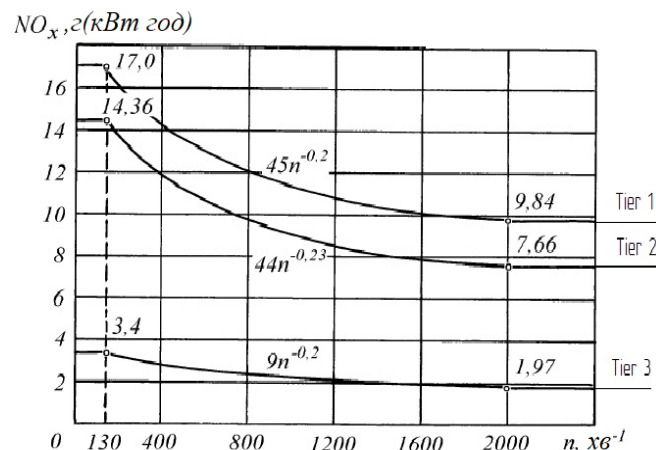


Рисунок 2 – Зміна вимог до концентрації оксидів азоту у відпрацьованих газах

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.

Існує досить багато технологій, які знижують шкідливі викиди і токсичність компонентів відпрацьованих газів морських суден. Відомі такі методи як - мокрі

методи, сухі методи, очищення палива від сірки, регулювання робочих і режимних параметрів. З їх допомогою можна добитися істотного зниження викидів оксидів сірки, оксидів азоту, оксидів вуглецю в результаті роботи суднових енергетичних установок.

Попереднє очищення палива від з'єднань сірки - технічно ця технологія освоєна, але процедура дуже дорога.

Паливopідготовка і регулювання режимних параметрів - до цих методів (для транспортних систем) можна віднести зміну конструктивних параметрів (форма камери згоряння, удосконалення форсунки і ін.).

Найбільш поширений метод – мокрий процес, коли гази йдуть через розчин вапняку, в результаті чого утворюються сульфат або сульфат кальцію; до найпростіших мокрим методам ставляться абсорбція за допомогою води, а також більш ємних поглиначів органічного походження (ксілідін, диметиланілін і ін.) або водних розчинів неорганічних речовин (луга, аміачна вода, вапнякова і вапняна пульпа і ін.). Переваги мокрих методів очищення полягає в їх високій ефективності, дешевизні реагентів, можливості одночасного уловлювання летючого попелу, щодо малих масогабаритних показниках установок.

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,

NOx), що вийшли з циліндрів двигуна, нейтралізуються в системі випуску до викиду їх в атмосферу.

Третій метод – поліпшення якості використовуваного палива, зниження вмісту в паливі сірки і ароматичних вуглеводнів або перехід до альтернативних видів палива.

Четвертий метод – застосування в якості палив водопаливних емульсій.

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

Рециркуляція відпрацьованих газів (від. англ. Exhaust Gas Recirculation (EGR)) – це спосіб значно зменшити утворення NOx в суднових дизельних двигунах.

Система рециркуляції відпрацьованих газів знижує температуру згоряння, тим самим знижуючи викиди оксидів азоту NOx. Знижується температура згоряння за рахунок збільшення питомої теплоємності газів в циліндрі і зниження загальної концентрації кисню. Рециркуляція відпрацьованих газів сприяє збільшенню вихлопів через зниження концентрації O₂, збільшення тривалості згорання і зниження температури згоряння.

У компанії Mitsubishi Heavy Industries виявили, що 28% рециркуляція відпрацьованих газів забезпечила 69%-ве зниження викидів NOx на двигуні MAN B&W 5S70MC при невеликому підвищенні вихлопу і витрати палива. Принципова схема системи рециркуляції відпрацьованих газів фірми Mitsubishi Heavy Industries зображена на рисунку 3.

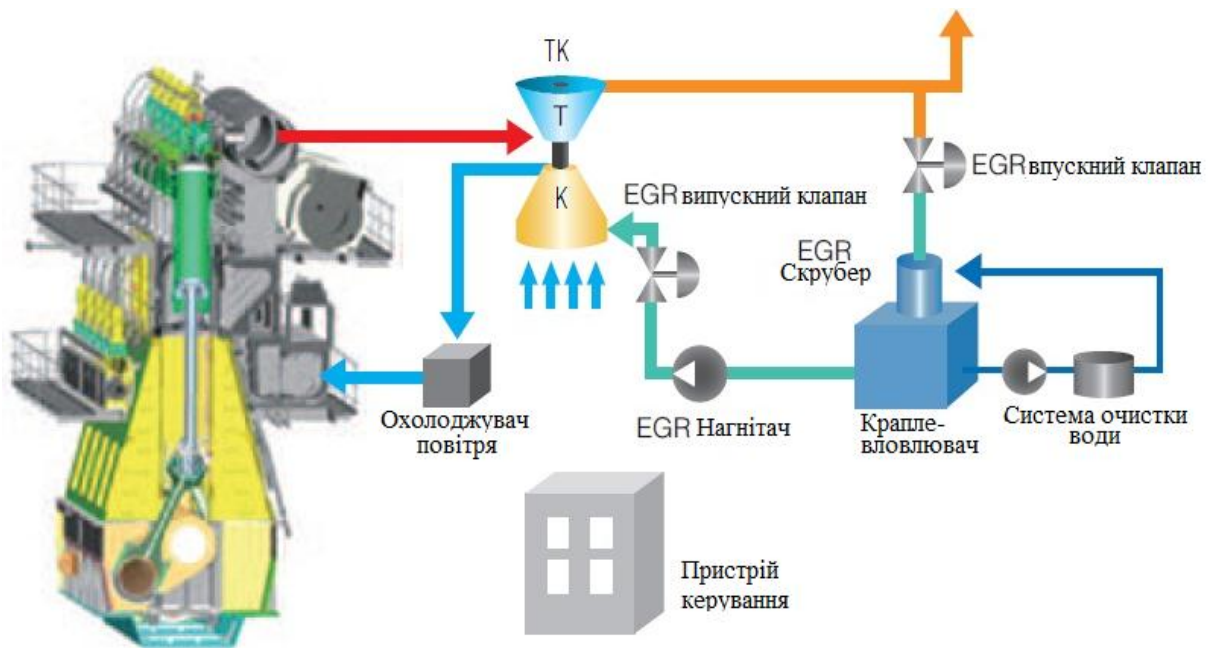


Рисунок 3 – Принципова схема системи рециркуляції відпрацьованих газів фірми Mitsubishi Heavy Industries

Інженери Wartsila виявили, що 6% рециркуляція відпрацьованих газів дала 22% зниження викидів NO_x на тестовому малообертовому двигуні 4RTX54 при зростанні теплового навантаження на компоненти двигуна і збільшення температури вихлопних газів [8].

Інженери Wartsila розробили механізм внутрішньої рециркуляції відпрацьованих газів в 2-тактних двигунах як більш успішний засіб ніж техніка підстроювання двигуна. При зниженні висоти продувних каналів приплив продувочного повітря в циліндр зменшується, так що в циліндрі залишається більше вихлопних газів для наступного циклу. Зниження продувних каналів також збільшує розрахунковий інтервал робочого

ходу поршня, що призводить до зниження витрати палива. Для подолання підвищеної теплової навантаження на двигун з вбудованим механізмом рециркуляції відпрацьованих газів інженери Wartsila розробляють програму «Залишковий газ з водяним охолодженням», яка передбачає введення води під час такту стиснення, щоб довести температуру в камері згоряння до потрібної без застосування вбудованого механізму рециркуляції відпрацьованих газів. Температура в камері згоряння досить висока, щоб уникнути кислотних відкладень. Закачування води також знижує викиди NO_x . Принципова схема системи рециркуляції відпрацьованих газів фірми Wartsila зображена на рисунку 4.

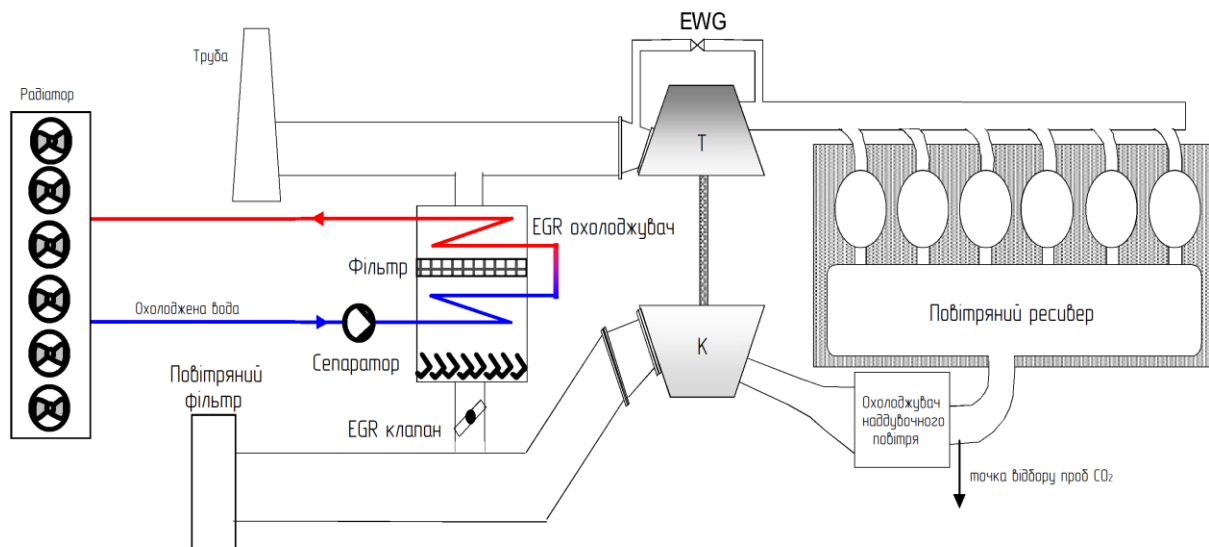


Рисунок 4 – Принципова схема системи рециркуляції відпрацьованих газів фірми Wartsila

3. Висновки

Аналізуючи склад відпрацьованих газів, можна прийти до висновку, що присутність порівняно невеликого за обсягом, але небезпечного по впливу кількості шкідливих речовин, значно впливає на стан здоров'я людини і навколишнє середовище.

Аналіз існуючих і передбачуваних вимог щодо зниження викидів токсичних компонентів з ВГ дизелів свідчить про постійне їх посилення. Вже сьогодні обговорюються норми Tier 4 без конкретних числових обмежень і числа контрольованих складових. Існує думка, що норматив Tier 4 буде істотно розширено кількістю контролюючих параметрів і доведений до значень, прийнятих в стандартах на токсичність для автомобільних і тракторних двигунів.

Література

1. Голубев, И. Р. Окружающая среда и транспорт: Учебное пособие / И.Р. Голубев, Ю.В. Новиков. - М.: Транспорт, 1987. - 96 с.
2. Кирпиченков, С.В. Регулируемая рециркуляция отработавших газов в системе комплексного снижения токсичных выбросов среднеоборотного дизеля речного

- судна: дис. канд.техн.наук: 05.22.19, 05.08.05 / Кирпиченков Сергей Владимирович. - М.: РГБ, 2001. - 152 с.
3. Авдевин, Д.Е. Повышение экологической безопасности дизельных установок судов выбором рациональной технологии нейтрализации оксидов азота в отработавших газах: дис. ... канд.техн.наук: 05.08.05 / Авдевин Дмитрий Евгеньевич. - СПб., 2003. - 190 с.
 4. Сизых, В.А. Судовые энергетические установки: Учебник для речных училищ и техникумов / В.А. Сизых - М.: Транспорт, 1989.- 263 с.
 5. Марков В.А. Токсичность отработавших газов дизелей / В.А. Марков, Р.М. Баширов, И.И. Габитов, В.Г. Кислов. - М.: Изд-во МГТУ им. Баумана, 2002. -376 с.
 6. Fournier A. Controlling Air Emission from Marine Vessels: Problems and Opportunities. A. Fournier. - University of California Santa Barbara, 2006. - 85 p.
 7. Александров, В.Ю. Экологические проблемы автомобильного транспорта: Аналитический обзор / В.Ю. Александров: РАН, Сиб. отд-ние, Гос.публич.науч.-техн.б-ка, Новосибир.обл.ком. по экологии и природ.ресурсам ПО "Север". - Новосибирск, 1995. - 112 с.
 8. Reduction of SO_2 , NO_x and Particulate Matter from Ships with Diesel Engines Environmental Project [Электронный ресурс]: no. 1510, 2014 - P. 114.

Analyzing the methods of reduction of toxic emissions from marine engines through exhaust gas recirculation

M. A. Pyrysunko

Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolaiv, Ukraine

The constant growth of the number of vessels and the power of their engines leads to an increase in the amount of fuel burned by it, and, consequently, to increase emissions of toxic components with exhaust gases. The growing pollution of the atmosphere with industrial and transport emissions is one of the most important and difficult problems of modernity. Diesel engines and boilers of sea vessels, which are still the most efficient in the energy sense, play a huge role in air pollution. So, during the combustion of diesel fuel, carbon (II) oxide, nitrogen oxides, hydrocarbons, sulfur oxides, aldehydes, and soot are released. During the operation of ship power plants, the exhaust gases of the main engines and boilers of marine vessels are emitted into the atmospheric air, the toxicity of which is determined both by the fuel grade and by the conditions of its combustion. The use of heavy fuels with high sulfur content helps to reduce operating costs for fuel, but it also increases environmental pollution with sulfur dioxide and sulfuric anhydride, increases wear and the number of failures of ship power plants. Exhaust gases of diesel engines have fairly high toxicity due to the high content of nitrogen oxides, sulfur oxides, soot and aldehydes. 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. 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: Emissions, nitrogen oxides, recirculation, diesel engine, exhaust gas.

References

1. **Golubev, I. R., Novikov, Yu.V.** (1987) *Environment and transport*: Study guide. Moscow: Transport, 96 p.
2. **Kirpichenkov, S. V.** (2001) Regulated exhaust gas recirculation in the system of comprehensive reduction of toxic emissions of a medium-speed diesel of a river vessel: dis. cand. tech. science: 05.22.19, 05.08.05. Moscow: RSL, 152 p.
3. **Avdevin, E. E.** (2003) Improving the environmental safety of ship diesel engines by choosing a rational technology for neutralizing nitrogen oxides in exhaust gases: dis. ... cand. tech. science: August 5, 05. SPb., 190 p.
4. **Sizykh, V. A.** (1989) Ship power plants: A textbook for river schools and technical schools. Moscow: Transport, 263 p.
5. **Markov, V. A., Bashirov, R. M., Gabitov, I. I., Kislov, V. G.** (2002) Toxicity of exhaust gases of diesel engines. Moscow: Publishing House of Moscow State Technical University, Bauman, 376 p.
6. **Fournier, A.** (2006) Controlling Air Emission from Marine Vessels: Problems and Opportunities. University of California, Santa Barbara, 85 p.
7. **Aleksandrov, V. Y.** (1995) Ecological problems of avtomobile transport: Analytical review. RAS, Sib. Department, Gos.pulich.nauch.-tehn.b-ka, Novosib.obl.kom. on ecology and nature, resources of software "North". Novosibirsk, 112 p.
8. Reduction of SO₂, NO_x and Particulate Matter from Ships with Diesel Engines Environmental Project: no. 1510, 2014, p. 114.

Received 22 October 2018

Approved 04 December 2018

Available in Internet 30 December 2018