

Врублевський Р.Є., Дзигар А.К., Сатулов А.І., Волкова А.С.

ЗНИЖЕННЯ ВИКИДІВ NO_x ЗАВДЯКИ ВИКОРИСТАННЮ ВОДНО-ПАЛИВНОЇ ЕМУЛЬСІЇ ПРИГОТОВЛЕНОЇ РОТОРНО-ПУЛЬСАЦІЙНИМ АПАРАТОМ

Морські судна з дизельними двигунами повинні відповідати постанові 13 Додатка VI MARPOL IMO і Технічному Коду 2008 NO_x . Міжнародний Сертифікат запобігання забруднення повітря (сертифікат EIAPP) потрібен для кожного двигуна. Незалежно від того, яка технологія використовується для виконання вимог, ті ж вимоги тестування й обмеження емісії NO_x повинні бути застосовані. Сертифікат EIAPP є доказом, що система двигуна, включаючи технологію скорочення емісії NO_x є відповідною. Одним із методів первинного зниження викидів NO_x судовими дизелями є використання водно-паливної емульсії (ВПЕ), де вода у вигляді найдрібніших крапель розподілена в паливі, а її вміст відповідає не більше 20 % до об'єму палива.

У статті проведено аналіз вибору апарату для приготування водно-паливної емульсії.

Для досягнення цілей дослідження вибрано роторно-пульсаційний апарат з пристроєм дозування та подачі води.

В процесі підготовки матеріалів до публікації описано конструкцію розробленого роторно-пульсаційного апарату, приведено схему цієї установки та схему модернізації паливної системи із розробленою установкою для приготування водно-паливної емульсії. Також в процесі досліджень розроблено установку із цим спроектованим роторно-пульсаційним апаратом та лабораторним дизель-генератором, який працює на двигуні Д-246.2.

У ході випробувань розробленого роторно-пульсаційного апарату на лабораторному дизель-генераторі з двигуном Д-246, при роботі його на водо-паливній емульсії приготуваної за допомогою вказаного апарату та на паливі без додавання води, було виявлено зниження вмісту оксидів азоту NO_x у порівнянні з паливом без вмісту води, що й свідчить про працездатність розробленого роторно-пульсаційного апарату.

Також досліджено якість та стійкість приготуваної водо-паливної емульсії розробленим роторно-пульсаційним апаратом та апаратом без дозованого пристрою.

У висновку всіх виконаних досліджень можна стверджувати, що розроблений роторно-пульсаційний апарат, виконує покладені на нього функції, та може використовуватися для зниження викидів оксидів азоту NO_x на судах.

Ключові слова: водно-паливна емульсія; роторно-пульсаційний апарат; паливо; викиди NO_x ; судовий дизель; диспергатори; модернізація паливної системи.

Вступ. Викиди оксидів азоту (NO_x) з судових двигунів на глобальному рівні є суттєвими. Сполуки NO_x беруть участь в утворенні фотохімічного смогу і кислотних дощів. Водний транспорт має значний вплив на якість повітря, особливо поблизу жвавих прибережних водних шляхів. Викиди оксидів азоту у повітрі перебувають від 1 до 3 днів, що може означати, що вони транспортуються на відстань від 400 до 1200 км.

Міжнародна морська організація (ІМО) прийняла конвенцію з контролю забруднення повітря з суден (MARPOL, Додаток VI). Двигун повинен відповідати певним обмеженням по емісії NO_x при роботі на тестовому режимі та повинен бути сертифікований відповідно до Технічного кодексу. Перед виробниками судових двигунів внутрішнього згорання (СДВЗ) поставлено завдання обмежити викиди NO_x без суттєвого збільшення витрати палива і димності відпрацьованих газів. Більшість виробників СДВЗ може задовольнити обмеження ІМО Tier II

використовуючи конструктивні зміни двигуна. Вони включають в себе підвищений тиск стиснення в поєднанні з пізніми фазами упорскування, збільшення інтенсивності уприскування, оптимізовані закони розпилювання палива, оптимізовані форми камери згоряння, зниження температури повітря ного заряду з електронним управлінням впорскування палива і змінними фазами газорозподілу. Більші скорочення меж, що встановлено вимогами ІМО Tier III, вимагають застосування альтернативних способів, як використання водопаливних емульсій або обробки відпрацьованих газів.

Постановка проблеми. Перехід від рівня обмеження NO_x Tier II до Tier III, як визначено в постанові 13 Додатка VI MARPOL ІМО, емісія NO_x повинна бути скорочена приблизно на 75 %. Це означає, що конструктивних змін двигуна недостатньо. Кілька технологій або комбінація технологій, можуть скоротити емісію до Рівня III. Цей список є вибором можливих технологій:

- двопаливні двигуни (DF) / газові двигуни;
- селективне каталітичне очищення (SCR);
- рециркуляція випускних газів (EGR);
- батареї/гібрид. Також у комбінації з технологіями скорочення NO_x ;
- паливні елементи/паливні елементи гібридних систем. Також у комбінації з технологіями скорочення NO_x , сертифіковані на Рівень III.

Морські судна з дизельними двигунами повинні відповідати постанові 13 Додатка VI MARPOL ІМО і Технічному Коду 2008 NO_x . Міжнародний Сертифікат запобігання забруднення повітря (сертифікат EIAPP) потрібен для кожного двигуна. Незалежно від того, яка технологія використовується для виконання вимог, ті ж вимоги тестування й обмеження емісії NO_x повинні бути застосовані. Сертифікат EIAPP є доказом, що система двигуна, включаючи технологію скорочення емісії NO_x є відповідною.

Одним із методів первинного зниження викидів NO_x судновими дизелями є використання водно-паливної емульсії (ВПЕ), де вода у вигляді найдрібніших крапель розподілена в паливі, а її вміст відповідає не більше 20 % до об'єму палива. При упорскуванні суміші додаткове тепло, необхідне для нагріву рідкої води до температури кипіння, сам випар, а також перегрівання водяної пари значно знижують температуру згорання і, отже, утворення NO_x . Попередній досвід вчених показує, що, як правило, викид NO_x знижується приблизно на 1 % на 1 % води, що присутня в суміші (у перерахунку на загальну масу). Тому актуальною задачею стає розробка апаратів для якісного приготування стабільної ВПЕ.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Існує багато способів та пристроїв для приготування ВПЕ. Із досліджень [1–20] можна зробити висновок, що в статичних апаратах перемішування відбувається при мінімальних витратах енергії, а на апаратах роторно-пульсаційного типу досягається висока якість емульсії, що готується, при значно менших енерговитратах у порівнянні з іншими типами диспергаторів (рис. 1). Тому, навіть у типовій конструкції роторно-пульсаційного апарату (РПА), на оброблювану ВПЕ виявляється фізична дія, обумовлена сукупністю великого числа чинників, що інтенсифікують технологічний процес перемішування.

Виходячи з вищевикладеного, для приготування ВПЕ на першому етапі доцільно використати статичний апарат (дозатор-змішувач), який не вимагає додаткового приводу, а на другому етапі – роторно-пульсаційний апарат із приводом від струменя палива. Ці пристрої повинні мати малі габарити і об'єм, а також високу надійність.

Проведемо аналіз конструкцій роторно-пульсаційних апаратів для приготування водно-дизельної суміші.

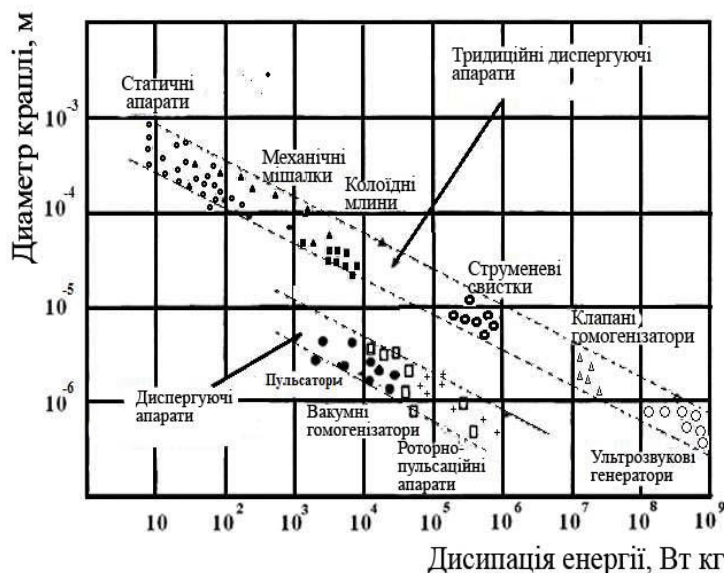


Рисунок 1 – Результати порівняння різних видів диспергаторів

Загальний вигляд найбільш перспективних роторно-пульсацийних апаратів показаний на рис. 2 та рис. 3 [8–15].

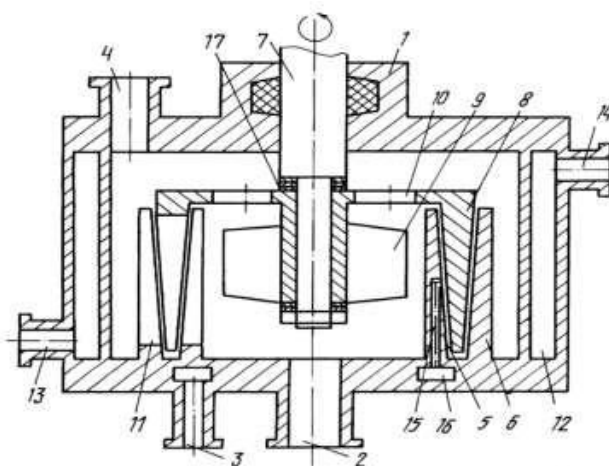


Рисунок 2 – Загальний вигляд роторно-пульсацийного апарата: 1 – корпус; 2, 3 – впускний патрубок; 4 – випускний патрубок; 5, 6 – кільця статора; 7 – вал; 8 – ротор; 9 – лопаті; 10 – отвори; 11 – коаксіальні конуси з прорізами; 12 – сорочка; 13, 14 – штуцери; 15 – канали; 16 – камера; 17 – регулювальна шайба

Проведений аналіз технічних засобів (пристроїв), що застосовуються для поліпшення експлуатаційних і екологічних показників СДВЗ показав, що найбільш раціональними є такі пристрої, які здатні впливати на робочий процес двигуна шляхом заміни дизельного палива на ВПЕ, що дозволяють мінімізувати фінансові витрати на модернізацію СДВЗ і організацію приготування ВПЕ.

Цим вимогам повною мірою задовольняє спосіб часткової заміни палива водою, що має теплоту випару майже в 8 разів вище, ніж у дизельного палива. При раціональному складі суміші падіння температури за рахунок випару води у ВПЕ відбувається більш ніж у 10 разів у порівнянні з паливо-повітряними сумішами, що забезпечує найкраще сумішоутворення в камері

згорання дизеля. При приготуванні ВПЕ доцільно перемішувати воду з паливом безпосередньо перед поданням у циліндри, що дозволить відмовитися від використання дорогих емульгаторів. Застосування такої ВПЕ може поліпшити експлуатаційні і екологічні показники СДВЗ.

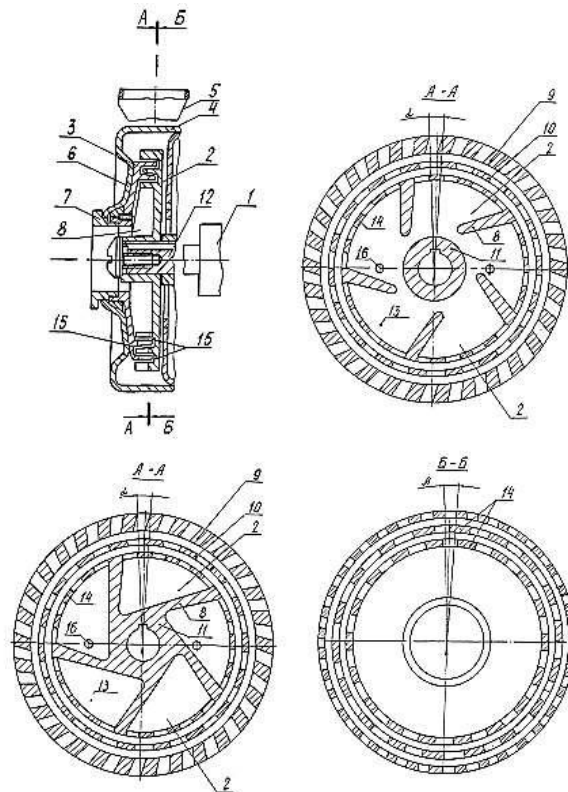


Рисунок 3 – Загальний вигляд і в розрізі по перерізах РПА: 1 – привід; 2 – ротор; 3 – статор; 4 – корпус; 5 – випускний патрубок; 6 – кришка; 7 – впускний патрубок; 8 – вхідні лопатки насоса; 9 – вихідні лопатки насоса; 10, 14 – зубчастий елемент; 11 – маточина; 12 – вал; 13 – камера; 15 – кільцеві канавки; 16 – розвантажувальні отвори

На підставі проведеного експериментального дослідження [12] впливу концентрації води на експлуатаційні показники СДВЗ встановлено, що раціональне співвідношення води по відношенню до об'єму палива становить 17...20 %. При цьому основні характеристики двигуна істотно не змінюються. Крім того, введення води інтенсифікує процес горіння допалюванням сажі за рахунок гідроксильного радикала (ОН), який також потрібний для горіння оксиду вуглецю (СО) (особливо при коефіцієнті надлишку повітря $\alpha \leq 1$) і перекладі його у вуглекислий газ (СО₂) [12].

Зміст у ВПЕ 17...20 % водного компонента істотно не змінюватиме хід хімічних реакцій, які активізують корозію металів, оскільки при нормальній експлуатації з відносною вологістю повітря 40...60 % в циліндр СДВЗ і так поступає не менше 10...20 % водяної пари від маси палива. Отримання ВПЕ, де компонентами є дві взаємно не змішувані рідини (вода і паливо), необхідно здійснювати в два етапи: перший етап – приготування «грубої» ВПЕ, у якій середній діаметр крапель води не перевищує 50 мкм; другий етап – приготування «тонкої» ВПЕ, у якій середній діаметр крапель водної фази складає близько 2 мкм.

Для приготування «грубої» ВПЕ доцільно використати апарат ежекційного принципу дії, який поєднує в собі функції дозатора і змішувача, оскільки при його використанні не потрібно додаткового приводу, а процес змішування здійснюється в результаті подання компонента, що дозується, в основний потік за рахунок різниці тисків, що створюється вставкою-дифузором. Для приготування «тонкої» ВПЕ необхідно використати РПА з виготовленням у його статорі двох рядів отворів, які сприятимуть збільшенню продуктивності апарату. Додатково треба

виготовити невелику кількість отворів і в роторі, яких буде досить для модуляції потоку оброблюваної рідини в каналах статора. Підвищення продуктивності РПА може бути досягнуте за рахунок використання багаторядної конструкції ротора і статора.

Пристрій, що готують водно-паливну емульсію, із заздалегідь підібраним оптимальним складом води і палива. Принципова схема приготування ВПЕ з елементами регулювання компонентів, що входять до її складу, представлено в роботі [1] і показано на рис. 5.

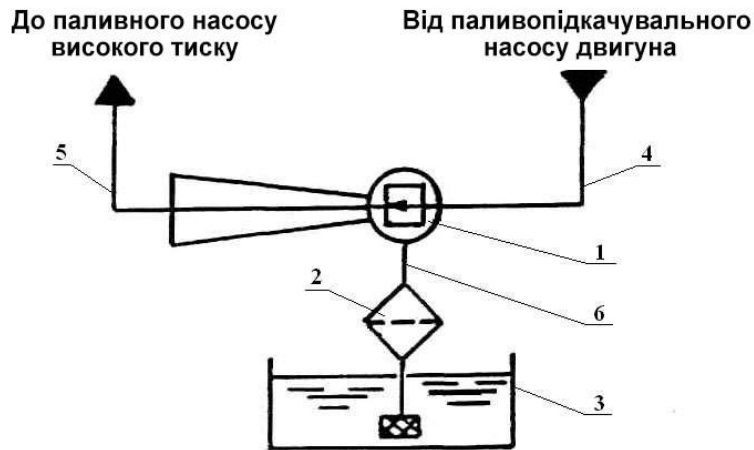


Рисунок 5 – Схема пристрою для подання води в дизельний ДВЗ

Цей пристрій (рис. 5) готує ВПЕ в системі живлення дизельного ДВЗ і складається з фільтра 2 для води, ежектора зі всмоктуючою склянкою 1, сполученою з місткістю для води.

Схема ежектора струминної кавітації показана на рис. 6 він складається з шестерні 10, зубчастої рейки 11, приводу зубчастої рейки 12, всмоктуючої склянки 14. Активне сопло може переміщатися уздовж корпусу ежектора і сполученого з ним різьбовим з'єднанням. Застосування такої конструкції дозволяє змінювати площу контакту різнорідних рідин у камері змішувача ежектора і управляти якістю ВПЕ, що готується, залежно від кількості водного компонента, що подається, та поступає для перемішування в камеру змішувача.

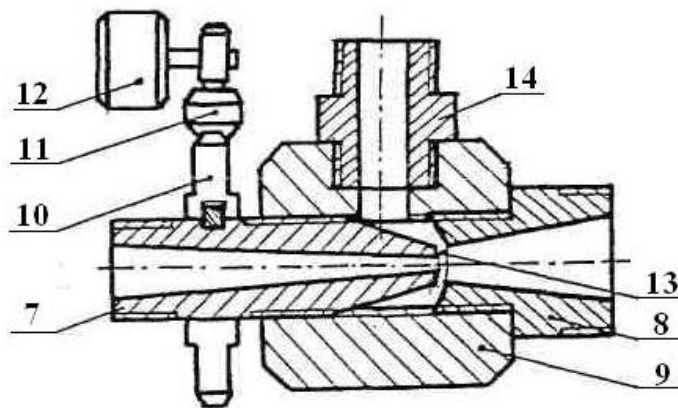


Рисунок 6 – Схема ежектора струминної кавітації

Експлуатаційні властивості ВПЕ, такі як щільність, в'язкість, температура застигання, температура спалаху, стійкість до розшарування залежать від змісту водного компонента, а також середніх розмірів крапель води (дисперсності). У ежекторах струминних кавітацій ці

величини є функцією тиску нагнітання палива в активному соплі та площі контакту води і палива, які визначаються площею перерізу робочої порожнини дифузора.

При роботі дизеля регулювання якості суміші, що готується, із застосуванням цього пристрою може робитися різними способами (вручну, гідроприводом, електроприводом) залежно від конструктивних особливостей його системи живлення. За результатами експериментального дослідження впливу відсоткового вмісту водного компонента на роботу дизельної силової установки встановлено, що із зростанням кількості водного компонента у водно-паливній суміші спостерігається лінійне зростання періоду затримки займання і відбувається зменшення шкідливих викидів NO_x на 30...40 % і сажі на 60 %. Вміст води склав 9...10 % відносно до об'єму палива.

Формулювання цілей статті. Розробка конструкції пристрою для приготування водно-паливної емульсії СДВЗ, що направлено на зниження викидів NO_x до рівня обмежень згідно ІМО Tier III.

Основні результати дослідження. Спираючись на аналіз різних апаратів та систем для приготування ВПЕ, автором для подальших наукових та практичних досліджень був вибраний роторно-пульсаційний апарат. В ході практичних та наукових досліджень була розроблена конструкція РПА, яка зображена на рис. 7. Дослідження показали, що поєднання двох апаратів: дозуючого воду та самого РПА дає максимальну ефективність при приготуванні ВПЕ. Завданням будь-якого пристрою для приготування ВПЕ – приготувати однорідний состав емульсії, яка має оптимальний діаметр крапель води. Оптимальний діаметр крапель води складає 5...10 мкм [4], при цьому розмірі крапель вода буде однорідно диспергувати в паливі в стабільну емульсію. Такий розмір крапель води дозволить їм краще диспергувати в паливі та довший час зберігати стабільність емульсії. Тобто більший час від процесу стабільної емульсії до процесу флокуляції (об'єднання крапель меншим діаметром у більші глобули води). Процес флокуляції та неоднорідність не допустимий для ВПЕ так як може призвести до корозії паливної апаратури, тому збільшення часу між цими двома процесами і є найголовнішим завданням при створенні апаратів для приготування емульсії.

Розроблений автором РПА (рис. 7) дозволяє вирішити завдання збільшення часу між двома процесами: стабільної емульсії та флокуляції, при приготуванні ВПЕ. Це досягається об'єднанням двох апаратів: дозатора води та РПА. Дозатор води подає воду в паливо краплями діаметром 5 мкм, це досягається тим що в трубі дозатора 6 (рис. 7) просвердлено отвори на відстані один від одного по всій поверхні труби. Таке розташування отворів дозволить утворюватися каплі води та зриватися з поверхні труби дозатору і при цьому не об'єднуватися в більш більші каплі та однорідно диспергувати у паливі. У існуючих апаратах для приготування ВПЕ вода подається не так дозовано, і краплі які вона утворює в паливі утворюються більшого діаметру, що зменшує час переходу до процесу флокуляції. А в деяких апаратах зовсім не якої дозованості немає, вода просто подається в зону апарату РПА.

Принцип роботи розробленого РПА (рис. 7) полягає в тому що вода яка подається до ємності дозатору через вхід 5, проходить скрізь отвори в трубі дозатору 6 утворюючи краплі певного діаметру. Краплі води які утворилися зриваються паливом яке надходить через впускний патрубок 4. Потім утворена емульсія надходить до ротору 1 який має вигляд диску з круговими елементами у вигляді зубців в яких просвердлені отвори для проходу та перемішування ВПЕ. Емульсія потрапляє на лопатки ротору 1 які перенаправляють її до статору 2, який також у вигляді диска з круговими зубцями в яких просвердлені отвори. Коли емульсія проходить між статором та ротором відбувається перемішування води с паливом до однорідної емульсії. Приготовлена ВПЕ потрапляє до випускного патрубку 3 де далі йде в систему паливоподачі. Таким чином у розробленому РПА, об'єднуються два апарати: апарат дозованої подачі води та сам розроблений РПА. Це об'єднання дозволить подати воду до апарату дозовано та її перемішати, що в свою чергу впливатиме на якість приготовленої ВПЕ

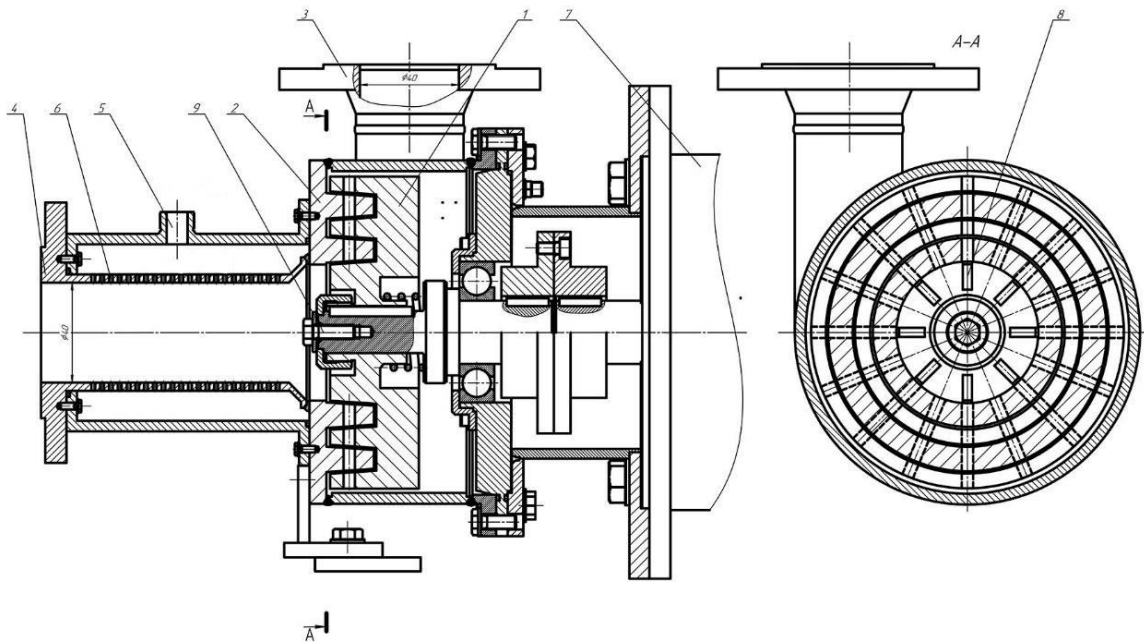


Рисунок 7 – Розроблений роторно-пульсаційний апарат із дозуючим пристроєм для приготування ВПЕ [16]

Стабільна та однорідна ВПЕ отримується після приготування в розробленому РПА завдяки процесу гідродинамічної кавітації – утворенню в емульсії порожнеч з розчиненими в ній газами. Після ударно-хвильових дій, які утворює розроблений апарат, порожнечі з газом в ВПЕ виникають між ротором та статором при обтіканні та ударом емульсією о них. Порожнечі з газом які утворилися в ВПЕ розпадаються на найдрібніші кавітаційні бульбашки, які потім лопаються та таким чином руйнують асфальтено-смолисті речовини в паливі.

Для регулювання різноманітних параметрів ударно-хвильових дій на ВПЕ використовується: 1) зазор між статором та ротором, який регулюється за допомоги регулювального гвинта 9 (рис.7) – впливає на розмір кавітаційних бульбашок та тиск ударних хвиль які утворює апарат на ВПЕ; 2) число рядів зубців які мають статор та ротор розроблювального апарату – впливає на загальний час ударно-хвильових дій на оброблювальну ВПЕ. Дана конструкція спроектованого РПА здатна забезпечити при обробці ВПЕ стабільну та однорідну емульсію в якій в'язкість не буде перевищувати в'язкості палива. Отримана в результаті емульсія буде складатися з найменших часок елементів які в неї входять що в свою чергу призведе до ефективного згоряння її та зниження шкідливих викидів відпрацьованих газів які забруднюють навколишнє середовище. Також емульсія отримана після обробки розробленим апаратом набагато збільшує час переходу від фази стабільної емульсії до фази флокуляції, що в свою чергу забезпечить роботу паливної апаратури з ВПЕ без шкоди для неї.

Дослідження впливу апарату на оброблювану ВПЕ показали:

1. Якщо зменшити кількість круглих рядів з зубцями одночасно у ротора та статора спостерігається зниження стабільності оброблювальної ВПЕ.

2. Якщо збільшити кількість круглих рядів з зубцями одночасно у ротора та статора витрата енергії на процес обробки суттєво збільшується.

3. Якщо при регулюванні зменшити зазор між ротором та статором до 0,3 мм, спостерігається різке зростання тиску ударних хвиль при лопанні кавітаційних бульбашок це призводить до збільшення подрібнення асфальтено-смолистих речовин та інших компонентів ВПЕ. Дуже високе подрібнення негативно впливає на в'язкість отриманої ВПЕ тому що менша частина асфальтено-смолистих речовин осідають на поверхні глобул води. Для протікання кращого процесу горіння необхідно щоб найбільша кількість асфальтено-смолистих речовин осідало на поверхні глобул води. Вода є найкращий чим повітря окисник для асфальтено-

смолистих речовин тому при згоранні ПВЕ де найбільша кількість асфальтено-смолистих речовин осіло на поверхні глобул води вони будуть максимально швидко згорати;

4. Якщо при регулюванні збільшити зазор між ротором та статором до 0,9 мм суттєво знижується подрібнення асфальтено-смолистих речовин та збільшення глобул води це негативно впливає на стабільність приготовленої ВПЕ та погіршує процес горіння суміші.

В подальших дослідженнях було розроблено установку з спроектованим апаратом РПА та лабораторним дизель-генератором з двигуном Д-246.2. На рис. 8 схематично зображено розроблене устаткування для приготування якісної ВПЕ. Устаткування складається з двох гілок: води та палива.

Принцип роботи устаткування (рис. 8):

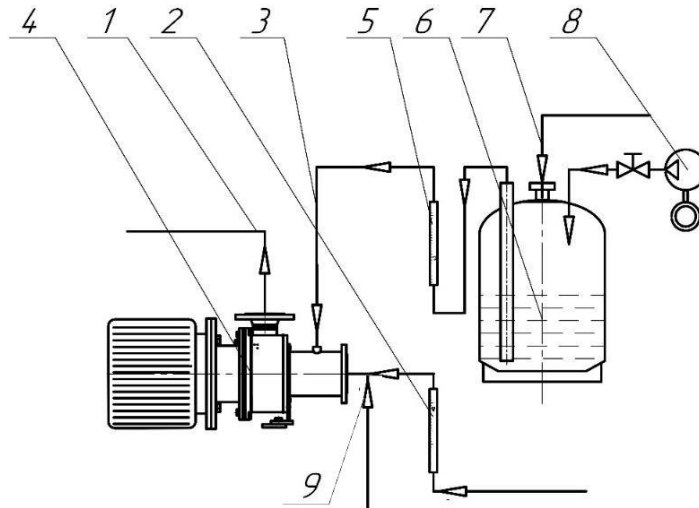


Рисунок 8 – Схема установки приготування ВПЕ [16]: 1 – вихід ВПЕ; 2 – ротаметр для палива; 3 – вхід води до РПА; 4 – розроблений РПА; 5 – ротаметр для води; 6 – бак для води; 7 – трубопровід із водою; 8 – компресор; 9 – місце додавання емульгатора

– гілка води: вода подається до баку 6 по трубопроводу 7. Компресор 8 слугує для нагнітання повітря в бак 6. Повітря яке було подане в бак 6 спричиняє тиск на воду що знаходиться в баку 6. Вода під тиском повітря рухається в напрямку ротаметру 5. Ротаметр потрібен для визначення кількості витраченої води за одиницю часу. Далі вода потрапляє до розробленого РПА 4.

– гілка палива: паливо, з емульгатором, надходить по трубопроводу до ротаметра 2. Ротаметр 2 потрібен для визначення кількості витраченого палива за одиницю часу. З ротаметру паливо потрапляє до розробленого РПА в якому і відбувається змішення палива та води в ВПЕ. Регулюванням подаванням води, регулюється кількісний її вміст в паливі.

На рис. 9 можна побачити схему модернізованої паливної системи лабораторного дизель-генератору з двигуном Д-246.1. Розроблене устаткування вбудоване в паливну систему та готує ВПЕ для лабораторного дизель-генератору. Для запобігання потрапляння ВПЕ в чисте паливо при різних аваріях та нештатних ситуаціях в схемі передбачено наявність запобіжної цистерни в яку перекачується ВПЕ. Процентний склад води в приготовленій суміші контролюється вимірювачем кількості води в паливі перед входом в двигун.

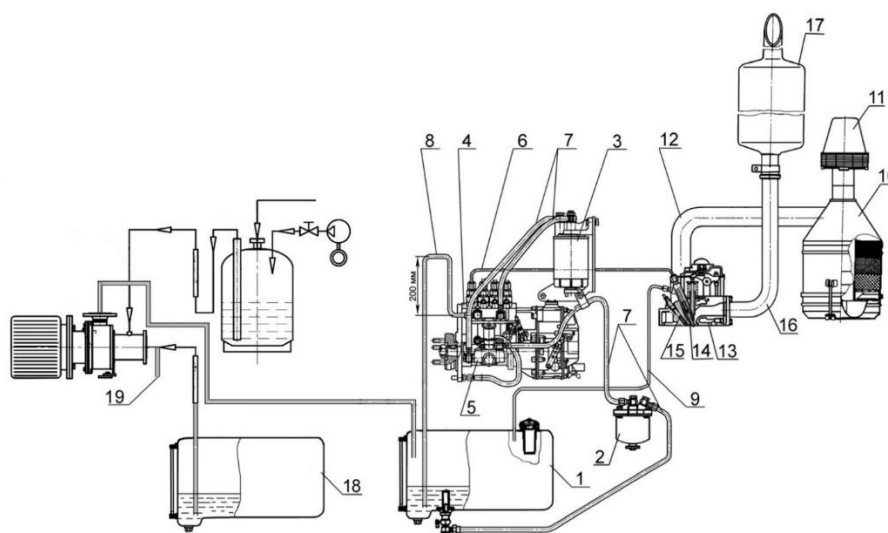


Рисунок 9 – Паливна система лабораторного дизель-генератору з двигуном Д-246.1 після модернізації [16]: 1 – паливний бак з ВПЕ; 2 – фільтр грубої очистки палива; 3- фільтр тонкого очищення палива; 4 – паливний насос високого тиску; 5 – паливопідкачуючий насос; 6 – трубки паливні високого тиску; 7 – трубки паливні низького тиску; 8 - трубка паливна низького тиску для відведення надлишків палива; 9 - трубка відведення палива в бак; 10 - очищувач повітря; 11 – моноциклон; 12 - впускний колектор; 13 – головка циліндрів; 14 – форсунка; 15 – свічка розжарювання; 16 – випускний колектор; 17 – глушник; 18 – паливний бак; 19 – місце додавання емульгатору

У порівнянні зі звичайним важким паливом використання водно-паливної емульсії дозволяє підвищити коефіцієнт спалювання палива і зменшити шкідливі викиди в атмосферу. Механізм цього ефекту пояснюється наступним. Важке паливо, потрапляючи в камеру згорання, розпорошується форсункою. Якщо в такій краплі палива перебувають включення більше дрібних крапель води, то, потрапляючи в область високої температури в циліндрі двигуна, краплі вибухають, розриваючи частки палива на безліч більш дрібних частинок, утворюючи «вторинний розпил». Це обумовлено великою різницею температур кипіння палива (430...550 °С) і води (100 °С). Описане вище явище обумовлює високу швидкість випаровування палива в циліндрі двигуна і більш швидке і повне вигорання його легких складових на першому етапі горіння. Далі, на другому етапі горіння, при досягненні високої температури в циліндрі двигуна від горіння легких фракцій палива, пари води і палива дисоціюють на активні радикали (*H*, *OH* та ін.). Ці радикали, які є каталізаторами горіння вуглецю, значно скорочують час горіння важких складових палива, у першу чергу залишків сажі. У результаті, на заключній стадії горіння палива в циліндрі двигуна, час вигорання залишків сажі, що становить до 40 % загального часу горіння краплі звичайного палива, у емульгованому паливі істотно скорочується. При цьому сумарна швидкість і повнота згорання в циліндрі двигуна палив у вигляді ВПЕ стає приблизно однаковою швидкості згорання легких дизельних палив. І, як результат, в'язке паливо повністю встигає згорати в циліндрах дизелів, різко знижуються відкладення нагару на деталях ЦПГ. Шкідливого впливу на деталі паливної апаратури частинки води водо-паливної емульсії не роблять, так як їх розміри менше зазорів у плунжерних парах і форсунках, а частинки води оточені зовні щільною плівкою палива, що оберігає від безпосереднього контакту металу з водою.

Нижче наводяться результати першого дослідження лабораторного дизель-генератору з двигуном Д-246.1 при роботі його на ВПЕ приготуваної за допомогою розробленого РПА та на паливі без додавання води (рис. 10 та рис. 11).

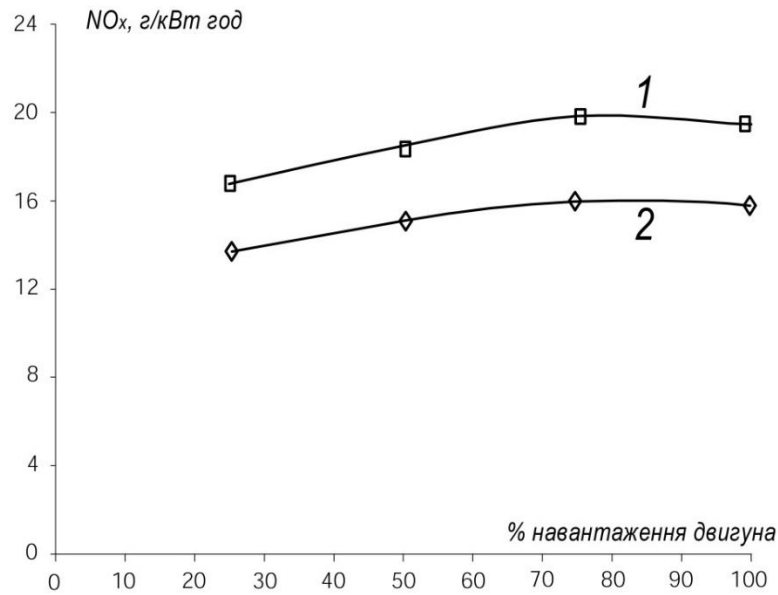


Рисунок 10 – Зміна концентрації оксидів азоту NO_x у залежності від навантаження двигуна:
1) графік NO_x палива без води; 2) графік NO_x ВПЕ з застосуванням розробленого РПА.

Висновки. Проаналізувавши різноманітність апаратів для приготування ВПЕ, було вибрано для розробки роторно-пульсаційний апарат, який дозволив приготувати більш якісну та стійку ВПЕ. Для підвищення якості та стійкості приготування ВПЕ, в апарат було додано пристрій дозування води, який подає воду до апарату певного діаметра крапель та її необхідну кількість.

Також розроблено схему установки розробленого РПА та схему паливної системи після модернізації. У ході випробувань розробленого РПА на лабораторному дизель-генераторі з двигуном Д-246.1, при роботі його на ВПЕ приготовленої за допомогою розробленого РПА та на паливі без додавання води, було виявлено зниження вмісту NO_x у порівнянні з паливом без вмісту води, що й свідчить про працездатність розробленого РПА.

У висновку всіх виконаних досліджень можна стверджувати, що розроблений РПА, виконує покладені на нього функції, та може використовуватися для зниження викидів NO_x на суднах.

Перспективи подальших досліджень:

- продовжити випробування апарату на різних сортах палива та різних дизельних двигунах;
- випробувати апарат у хімічній, нафтопереробній, паливо-енергетичній промисловості, зокрема для приготування до спалювання в котлоагрегатах або зберігання різних паливних сумішей (отримання емульсій паливних сумішей, у тому числі мазуту, що містить воду);
- більш докладніше проаналізувати під час досліджень відсоток зменшення викидів шкідливих речовин.

ЛІТЕРАТУРА

1. Prado J. M., Dalmolin I., Carareto N. D. D., Basso R. C. et al 2012 Show more Supercritical fluid extraction of grape seed: Process scale-up, extract chemical composition and economic evaluation J. of Food Engineer. 109 (2) 249–57.
2. Kaluza P., Kölzch A., Gastner M., & Blasius B. The complex network of global cargo ship movements. J. R. Soc. Interface, 7. 1093–1103.

3. Kegl P., & Pehan S. Reduction of diesel engine emissions by water injection. SAE Technical Paper Series, 2001-01-3259.
4. MAN Diesel & Turbo. How to influence CO₂ emissions. Retrieved December 3, 2010, from [www.mandieselturbo.com:http://www.mandieselturbo.com/files/news/files/15013/5510-00_83-00ppr_low.pdf](http://www.mandieselturbo.com/files/news/files/15013/5510-00_83-00ppr_low.pdf).
5. MAN Diesel & Turbo. Project guides. Retrieved December 6, 2010, from [www.mandieselturbo.com: http://www.mandieselturbo.com/0000861/Products/Marine-Engines-and -Systems/Low-Speed/Project-Guides.html](http://www.mandieselturbo.com/0000861/Products/Marine-Engines-and-Systems/Low-Speed/Project-Guides.html).
6. MAN Diesel & Turbo. Tier III compliance low speed engines. Retrieved December 6, 2010, from [www.,mandieselturbo.com: http://www.mandieselturbo. com/1015014/Press/ Publications/Technical-Papers/Marine-Power/Low-Speed/Tier-III-Compliance-%E2%80%93Low-Speed-Engines.html](http://www.mandieselturbo.com/1015014/Press/Publications/Technical-Papers/Marine-Power/Low-Speed/Tier-III-Compliance-%E2%80%93Low-Speed-Engines.html).
7. Fiori L. Supercritical extraction of grape seed oil at industrial-scale: Plant and process design, modeling, economic feasibility Chem. Engineer. and Proc.: Process Intensificat. 49 (8) 866–72.
8. Khanal Ramesh C. Effect of heating on the stability of grape and blueberry pomace procyanidins and total anthocyanins Food Res. Int. 43 (5) 1464–9.
9. Teleshev A. T., Marynkin I. A., Titov I. N et al 2016 Obtaining liquid humic biological product based on vermicompost and grape squeeze Bull. of biotechnol. and physico-chemi. Biol. 12(4) 52–5.
10. Konovalov A. I. Formation of nanoscale molecular ensembles in highly diluted aqueous solutions J. of RAS 83(12) 1076–82.
11. Rogovsky V. S., Matyushin A. L., Shimanovsky N. L. et al 2010 Antiproliferative and antioxidant activity of new derivatives of dihydroquercetin Experimental and Clin. Pharmacol. 9 39–42.
12. Novikov V. S. “Homogenization and dispersion in modern technology: a review,” Pom. Teplotekh., 12, No. 5, 40–59 (1990).
13. Augustina O. Emulsion Treatment in the Oil Industry: A Case Study of Oredo Field Crude Oil Emulsion [Text] / O. Augustina, S. Okotie // SPE Nigeria Annual International Conference and Exhibition, 2015. doi: 10.2118/178381-ms.
14. Malahov A. V. Jet forces analysis for cones [Text] / A. V. Malahov, O. V. Streltsov, I. Z. Maslov, R. G. Gudilko // Proceedings of the 1st International Academic Conference “Science and Education in Australia, America and Eurasia: Fundamental and Applied Science”, 2014.
15. Yuan Z. Risk analysis on ship to ship crude oil transfer at sea [Text] / Z. Yuan, W. Su // 2015 International Conference on Transportation Information and Safety (ICTIS), 2015. doi: 10.1109/ictis.2015.7232202.
16. Врублевський Р. Є. Використання роторно-пульсаційного апарату для приготування водно-паливної емульсії // Сучасні енергетичні установки на транспорті і технології та обладнання для їх обслуговування: міжнародна наук.-практ. конф., 07-09 вер. 2022 р.: тези доп. Херсон: ХДМА. 2022. С. 79–82.
17. Врублевський Р. Є. Використання гомогенізатору для підвищення економії палива та екологічних показників головного двигуна // Сучасні енергетичні установки на транспорті і технології та обладнання для їх обслуговування: міжнародна наук.-практ. конф., 16-18 бер. 2023 р.: тези доп. Херсон: ХДМА. 2022. С. 123–125.
18. Xinyan Pei, Paolo Guida, K. M. AlAhmadi, Ibrahim A. Al Ghamdi, Saumitra Saxena, William L. Roberts. Cenosphere formation of heavy fuel oil/water emulsion combustion in a swirling flame. Fuel Processing Technology Volume 216, 1 June 2021, Page 106800. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2021.106800>.
19. Olanrewaju W. Bello, Ehsan Abbasi-Atibeh, Larry Kostiuk, Jason S. Olfert. Effects of external injection of deionized water and water with impurities on Water-assisted flares. Fuel Volume 340, 15 May 2023, Page 127602. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2023.127602>.
20. Elia Colleoni, Gianmaria Viciconte, Chiara Canciani, Saumitra Saxena, Paolo Guida, William L. Roberts. Sonoprocessing of oil: Asphaltene declustering behind fine ultrasonic emulsions. Clean Combustion Research Center, King Abdullah University of Science and Technology, Thuwal 23955, Saudi Arabia. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2023.106476>.

REFERENCES

1. Prado, J. M., Dalmolin, I., Carareto, N. D. D. (2012). Basso R C et al 2012 Show more Supercritical fluid extraction of grape seed: Process scale-up, extract chemical composition and economic evaluation J. of Food Engineer. 109(2) 249–57.
2. Kaluza, P., Kölzch, A., Gastner, M., & Blasius, B. (2010). The complex network of global cargo ship movements. J. R. Soc. Interface, 7, 1093–1103.
3. Kegl, P., & Pehan, S. (2001). Reduction of diesel engine emissions by water injection. SAE Technical Paper Series, 2001-01-3259.
4. MAN Diesel & Turbo. (2010, August 25). How to influence CO2 emissions. Retrieved December 3, 2010, from [www.mandieselturbo.com:http://www.mandieselturbo.com/files/news/files_of15013/5510-0083-00ppr_low.pdf](http://www.mandieselturbo.com/files/news/files_of15013/5510-0083-00ppr_low.pdf).
5. MAN Diesel & Turbo. (2010). Project guides. Retrieved December 6, 2010, from [www.mandieselturbo.com: http://www.mandieselturbo.com/0000861/Products/Marine-Engines-and-Systems/Low-Speed/Project-Guides.html](http://www.mandieselturbo.com/0000861/Products/Marine-Engines-and-Systems/Low-Speed/Project-Guides.html).
6. MAN Diesel & Turbo. (2010, August 25). Tier III compliance low speed engines. Retrieved December 6, 2010, from [www.,mandieselturbo.com: http://www.mandieselturbo.com/1015014/Press/Publications/Technical-Papers/Marine-Power/Low-Speed/Tier-III-Compliance-%E2%80%93Low-Speed-Engines.html](http://www.mandieselturbo.com/1015014/Press/Publications/Technical-Papers/Marine-Power/Low-Speed/Tier-III-Compliance-%E2%80%93Low-Speed-Engines.html).
7. Fiori, L. (2010). Supercritical extraction of grape seed oil at industrial-scale: Plant and process design, modeling, economic feasibility Chem. Engineer. and Proc.: Process Intensificat. 49(8) 866–72.
8. Khanal Ramesh, C. (2010). Effect of heating on the stability of grape and blueberry pomace procyanidins and total anthocyanins Food Res. Int. 43(5) 1464–9.
9. Teleshev, A. T., Marynkin, I. A., Titov, I. N. et al 2016 Obtaining liquid humic biological product based on vermicompost and grape squeeze Bull. of biotechnol. and physico-chemi. Biol. 12(4) 52–5.
10. Konovalov, A. I. (2013). Formation of nanoscale molecular ensembles in highly diluted aqueous solutions J. of RAS 83(12) 1076–82.
11. Rogovsky, V. S., Matyushin, A. L., Shimanovsky, N. L. et al 2010 Antiproliferative and antioxidant activity of new derivatives of dihydroquercetin Experimental and Clin. Pharmacol. 9 39–42.
12. Novikov, V. S. (1990). “Homogenization and dispersion in modern technology: a review” Pom. Teplotekh., 12, No. 5, 40–59.
13. Augustina, O. (2015). Emulsion Treatment in the Oil Industry: A Case Study of Oredo Field Crude Oil Emulsion [Text] / O. Augustina, S. Okotie // SPE Nigeria Annual International Conference and Exhibition, doi: 10.2118/178381-ms.
14. Malahov, A. V. (2014). Jet forces analysis for cones [Text] / A. V. Malahov, O. V. Streltsov, I. Z. Maslov, R. G. Gudilko // Proceedings of the 1st International Academic Conference “Science and Education in Australia, America and Eurasia: Fundamental and Applied Science”.
15. Yuan, Z. (2015). Risk analysis on ship to ship crude oil transfer at sea [Text] / Z. Yuan, W. Su // 2015 International Conference on Transportation Information and Safety (ICTIS). doi: 10.1109/ictis.2015.7232202.
16. Vrublevskiy, R. Ye. (2022). The use of a rotary-pulsation apparatus for the preparation of a water-fuel emulsion [*Vykorystannia rotorno-pulsatsiinoho aparatu dlia pryhotuvannia vodno-palyvnoi emulsii*]. Modern energy installations on transport, technologies and equipment for their maintenance: International scientific and practical conference, September 7-9, 2022. Kherson: KSMA. Pp. 79–82.
17. Vrublevskiy, R. Ye. (2023). Using a homogenizer to improve fuel economy and environmental performance of the main engine [*Vykorystannia homohenizatoru dlia pidvyshchennia ekonomii palyvta ekolohichnykh pokaznykiv holovnoho dvyhuna*]. Modern energy installations on transport, technologies and equipment for their maintenance: International scientific and practical conference, Murch 16-18, 2023. Kherson: KSMA. Pp. 123–125.
18. Xinyan Pei, Paolo Guida, K. M. AlAhmadi, Ibrahim A. Al Ghamdi, Saumitra Saxena, William L. Roberts. (1 June 2021). Cenosphere formation of heavy fuel oil/water emulsion combustion in a

swirling flame. Fuel Processing Technology Volume 216, Page 106800. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2021.106800>.

19. Olanrewaju, W. Bello, Ehsan Abbasi-Atibeh, Larry Kostiuk, Jason S. Olfert. (15 May 2023). Effects of external injection of deionized water and water with impurities on Water-assisted flares. Fuel Volume 340, Page 127602. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2023.127602>.

20. Elia Colleoni, Gianmaria Viciconte, Chiara Canciani, Saumitra Saxena, Paolo Guida, William L. Roberts. (2023). Sonoprocessing of oil: Asphaltene declustering behind fine ultrasonic emulsions. Clean Combustion Research Center, King Abdullah University of Science and Technology, Thuwal 23955, Saudi Arabia. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2023.106476>.

Roman Vrublevskiy, Anatolii Dzygar, Anatolii Satulov, Anna Volkova
REDUCTION OF NO_x EMISSIONS DUE TO THE USE OF WATER-FUEL EMULSION PREPARED BY THE DESIGNED ROTOR-PULSATION APPARATUS

Marine vessels with diesel engines must comply with Regulation 13 of Annex VI of MARPOL IMO and the Technical Code 2008 NO_x. An International Air Pollution Prevention Certificate (EIAPP certificate) is required for each engine. Regardless of which technology is used to meet the requirements, the same testing requirements and NO_x emission limits must apply. The EIAPP certificate is proof that the engine system, including the NO_x emission reduction technology, is compliant. One of the methods of primary reduction of NO_x emissions by marine diesels is the use of water-fuel emulsion (WPE), where water in the form of the smallest droplets is distributed in the fuel, and its content corresponds to no more than 20% of the fuel volume.

The article analyzes the choice of an apparatus for preparing a water-fuel emulsion.

To achieve the goals of the research, a rotary-pulsation apparatus with a device for dosing and supplying water was selected.

In the process of preparing materials for publication, the design of the developed rotary-pulsation apparatus is described, the scheme of this installation and the scheme of modernization of the fuel system with the developed installation for the preparation of water-fuel emulsion are given. Also, in the course of research, an installation with this designed rotor-pulsation apparatus and a laboratory diesel generator, which runs on the D-246.2 engine, was developed.

In the course of tests of the developed rotor-pulsation device on a laboratory diesel generator with a D-246 engine, during its operation on a water-fuel emulsion prepared with the help of the developed rotor-pulsation device and on fuel without the addition of water, a decrease in the content of nitrogen oxides NO_x in compared to the fuel without water content, which testifies to the efficiency of the developed rotor-pulsation device.

The quality and stability of the water-fuel emulsion prepared by the developed rotary-pulsation apparatus and the apparatus without a dosing device were also investigated.

In the conclusion of all the conducted studies, it can be stated that the developed rotary-pulsation device fulfills the functions assigned to it and can be used to reduce emissions of nitrogen oxides NO_x on ships.

Keywords: *water-fuel emulsion; rotary-pulsating apparatus; fuel; NO_x emissions; marine diesel; dispersers; fuel system modernization.*