

Урум Н.С.

Державний університет інфраструктури та технологій

Маннапова О.В.

Державний університет інфраструктури та технологій

Рященко О.І.

Державний університет інфраструктури та технологій

Лісовський С.В.

Державний університет інфраструктури та технологій

ПОРІВНЯННЯ ВИКИДІВ ЗГОРЯННЯ НОВІТНІХ СУДНОВИХ ПАЛИВ З НИЗЬКИМ ВМІСТОМ СІРКИ

Метою роботи є розробка методики оцінки функціональних якостей випробуваних палив і встановлення рейтингу для прийняття раціональних експлуатаційних рішень щодо їхнього подальшого застосування для живлення повнорозмірних суднових двигунів. Поставлена мета досягається шляхом випробування на лабораторному стенді модифікованих суднових палив у класичному одноциліндровому чотиритактному дизелі з модифікованою системою подачі палива в реальних умовах експлуатації двигуна із запалюванням від стиснення та аналізі отриманих результатів. Отримання порівняно однакових умов випробувань досягається заміною мастила і наконечників паливної форсунки перед кожним випробуванням двигуна на іншому паливі. Для порівняльного аналізу випробуваних суднових палив реєстрація контрольних параметрів проводиться на одному і тому ж еталонному навантаженні двигуна в трьох/чотирьох серіях вимірювань. На основі результатів проведених вимірювань можна побудувати діаграму Санкі, гістограму об'ємних часток шкідливих і токсичних газів у відпрацьованих газах двигуна та характеристичні коефіцієнти корисної дії енергетичних процесів. Вимірювальна система дозволяє знімати діагностичні дані і точно спостерігати робочі і супутні процеси під час різних режимів роботи двигуна і всієї пропульсивної установки. За результатами, отриманими вимірювальною системою, оцінювався технічний стан робочого простору і системи впорскування двигуна. За результатами випробувань може бути прийнято рішення щодо їх перенесення для живлення повнорозмірних суднових двигунів на основі багатокритеріальної оцінки з використанням інструментарію дослідження операцій. Для оцінки складного явища за набором діагностичних параметрів проведено нормалізацію вихідних змінних, що дозволяє застосовувати процедуру агрегування для отримання значень агрегованої змінної для побудови рейтингу системи. Для оцінки придатності досліджуваних суднових палив запропоновано фізичну модель діагностичних параметрів, найбільш чутливих до зміни застосовуваного палива. Виділені діагностичні параметри поділялися на стимулятори, дестимулятори і номінанти.

Ключові слова: фізична модель, відпрацьовані гази, метод, дизельний двигун, рейтинг, стимулятор, дестимулятор, номінант.

Постановка проблеми. В останні роки ІМО ввела серйозні обмеження щодо кількості шкідливих викидів у морську атмосферу з відпрацьованими газами суднових двигунів. Для рішення цієї проблеми провідні морські країни почали широко застосовувати низькосірчисті судові палива. Тому для оцінки ефектів згоряння і викидів цих палив проводиться низка прикладних досліджень на повнорозмірних суднових двигунах або випробувальних стендах [1–5]. За їх результатами визначаються основні енергетичні та емісійні

параметри двигуна конкретного типу, а також гарантований час роботи його конструктивних елементів.

Під час випробувань досліджується застосування і фактичний вплив на структуру основних функціональних підсистем двигуна нестандартного палива. Для зменшення матеріальних витрат, часу проведення досліджень та ін. випробування проводяться в лабораторних умовах на спеціально адаптованих і дозованих стендах [1]. При цьому також досліджується взаємозв'язок кількості

використовуваного пального і викидів в атмосферу шкідливих речовин у складі вихлопних газів двигуна.

Але такі модифіковані суднові палива матимуть високу щільність та в'язкість і високу температуру під час розпилення. Випробувальний двигун правильно функціонує лише за умови постійного підтримання в'язкості палива, що впорскується в камеру згоряння. Цей процес стає особливо чутливим при перемиканні живлення двигуна з дистильного палива (пуск і зупинка) на низькосірчисте (тривала робота) і навпаки. За результатами лабораторних випробувань суднового палива однозначно оцінюється його придатність для впровадження в системах живлення повнорозмірних суднових двигунів за умови періодичної оцінки їх технічного стану [6].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Вплив новостворених низькосірчистих суднових палив на функціонування та довговічність дизельного двигуна досліджено недостатньо. Це – абсолютно нова експлуатаційна проблема, пов'язана з радикальним обмеженням вмісту сірки в суднових паливах і появою на паливному ринку модифікованих суднових палив.

Більш того, це питання загострюється у зв'язку із введенням у дію нових жорстких екологічних норм. Тому науковці і практики наполегливо працюють над зниженням екологічного навантаження засобів водного транспорту, особливо зменшенням шкідливих відходів від роботи дизелів.

Робота [2] вивчає особливості застосування штучних нейронних мереж як альтернативу прямим вимірюванням концентрації оксидів азоту у вихлопних газах суднового дизеля, що проводяться на судні в морі. Наведено результати лабораторних досліджень і моделювання певних процесів за допомогою обраних мереж.

У роботі [3] розглянуто можливість використання альтернативних видів палива (нафтового палива, природного газу та водню) для скорочення викидів за конкурентними цінами. Було розроблено чисельну модель, за результатами якої встановлено, що водень є самим дорогим для морських застосувань, але в найчистішому паливом по відношенню до CO_2 , вуглеводнів (НС) та оксиду вуглецю (СО). Природний газ дешевший і чистіший за мазут щодо викидів CO_2 і СО, але викидає більше NO_x і НС, ніж нафтове паливо. Викиди SO_x в основному залежать від вмісту сірки в кожному конкретному виді палива.

У роботі [4] досліджено варіант зменшення забруднення морського середовища через застосу-

вання трипаливних двигунів: водень-природний газ-дизель. Доведено, що трипаливний двигун має швидшу реакцію і кращі показники потужності, ніж двопаливний двигун (CH_4 +дизель), а викиди вихлопних газів суден у зв'язку зі збільшенням частки водню значно зменшуються.

У роботі [5] наведені результати тестування морського дизельного палива з низьким вмістом сірки в морських дизельних двигунах при їх різних навантаженнях. Встановлено, що викиди CO_2 і НС значно зменшилися при навантаженні від 25% до 75%, а при 100% навантаженні дещо збільшилися. Викиди НС або СО при чотирьох робочих режимах були нижчими за гранично допустимі. Хоча частка NO_x у вихлопних газах зростала зі збільшенням навантаження на двигун, але викиди NO_x завжди були в допустимих межах. Тестовий двигун показав хороші показники викидів, які відповідають поточним вимогам ІМО щодо викидів.

Роботу [6] присвячено дослідженню впливу фізичних властивостей альтернативних видів палива на продуктивність суднового дизельного двигуна. Вивчені різниці тиску і температури в циліндрі для різних альтернативних видів палива, доведені їх мінімальні значення для важкої нафти. Також доведено, що через гірше згоряння, маса сажі має максимальне значення для важкого мазуту.

У роботі [7] розглянуто вплив додавання нерафінованих і рафінованих біодизелів на мастильна здатність дизельного палива та їхній вплив на підсумкову концентрацію шкідливих речовин у ВГ.

Робота [8] також присвячена вивченню питань зменшення забруднення вихлопних газів у дизельних двигунах при порівнянні мастильних властивостей біодизельних сумішей та чистого нафтового дизельного палива. За результатами досліджень встановлено, що у випадку з біодизелем викиди O_2 можуть бути збільшені на 12,85%, а викиди диму можуть бути зменшені до 15,89%, що свідчить про доцільність застосування біодизельних добавок для покращення експлуатаційних характеристик двигуна.

Мастильні характеристики суднових дистильних палив та їх вплив на кінцеві результати викидів шкідливих речовин у вихлопних газах морських дизелів розглянуто у роботі [9].

Робота [10] надає рекомендацій екіпажу щодо особливостей експлуатації суден, що використовують паливо з меншим вмістом сірки, та варіанти дій щодо зниження вмісту шкідливих речовин у ВГ.

Постановка завдання. Метою роботи є розробка методики оцінки функціональних якостей випробуваних палив і встановлення рейтингу для прийняття раціональних експлуатаційних рішень щодо їхнього подальшого застосування для живлення повнорозмірних судових двигунів.

Виклад основного матеріалу. Центральним елементом лабораторного стенду для випробування модифікованих судових палив є класичний одноциліндровий чотиритактний дизель з модифікованою системою подачі палива [11]. Через пасову передачу двигун приводить в дію генератор постійного струму, який живить систему підігріву «важкого палива». Двигун має максимально спрощені системи подачі палива і повітря, охолодження і змащення, що позитивно відбивається на балансуванні енергетичних процесів.

Установка зовнішнього паливоподавання гарантує точне підтримання необхідних значень параметрів впорскуваного палива під час роботи, особливо при переході системи живлення з дистильованого палива на залишкове (і навпаки). На стенді це реалізоване ручним змішуванням обидвох видів палива за допомогою триходових клапанів. Але при цьому порушилася термічна стабільність і чутливість до будь-яких збурень потоку, у т. ч. при зміні навантаження на двигун. Стабілізацію температури і в'язкості палива в баках і підтримання інтенсивності його нагріву забезпечують точні електронні термостати з ПІД-регулюванням.

Схема організації випробувань модифікованих судових палив є такою. На першому етапі зразок досліджуваного палива очищується від води і твердих частинок на центрифугі стенді. Це забезпечує захист системи впорскування досліджуваного двигуна від руйнівного впливу забрудненого палива. Багато зусиль спрямовано на підтримання максимально можливої температури завихреного палива протягом процесу центрифугування. Однак, «занадто ретельне» центрифугування палива не відповідає реальним умовам живлення двигунів на судах, де кількість відокремленого шламу не перевищує 3% від загального підйому палива.

Далі визначається елементарний хімічний склад та теплотворна здатність центрифугованого зразка досліджуваного палива. За визначеною теплою згоряння палива точно розраховується кількість хімічної енергії, що підводиться до камери згоряння випробовуваного двигуна. Визначення затримки самозаймання досліджуваного палива за допомогою цетанового числа (дистильовані палива) або індексу CCAI (залишкові

палива) дозволяють здійснювати подальший аналіз ефективності робочого процесу.

Маючи повну апостеріорну характеристику досліджуваного палива, проводять його випробування в реальних умовах експлуатації двигуна із запалюванням від стиснення. Отримання порівняно однакових умов випробувань досягається заміною мастила і наконечників паливної форсунки перед кожним випробуванням двигуна на іншому паливі.

Запис енергетичних та емісійних характеристик дизеля, що працює на різних видах судових палив, починається в останню хвилину 20-хвилинного періоду сталої роботи двигуна при заданому навантаженні [1]. Для порівняльного аналізу випробуваних судових палив з точки зору їх енергетичних та емісійних якостей реєстрація контрольних параметрів проводиться на одному і тому ж максимально досяжному еталонному навантаженні двигуна в трьох/чотирьох серіях вимірювань.

Результати проведених вимірювань дозволяють побудувати діаграму потоку енергії в досліджуваному двигуні і всій пропульсивній установці (діаграма Санкі). Також будуються гістограма об'ємних часток шкідливих і токсичних газів у відпрацьованих газах двигуна та характеристичні коефіцієнти корисної дії енергетичних процесів.

Випробування двигуна у нестационарних режимах має на меті оцінку його динамічних профілів під час переходу від одного стаціонарного режиму до іншого. Система керування досліджуваного дизеля дозволяє проводити ступінчасті зміни моменту навантаження, відповідним чином регулюючи струм якоря генератора.

В експериментальній установці використано стандартний дизельний двигун Farquhann типу D10 і генератор постійного струму, призначений для приводу допоміжних пристроїв в силових установках суден. У випробуваннях нового виду судового палива використовувалося вузькоспеціалізоване вимірювальне обладнання.

Контрольовані режими роботи двигуна і керуючі параметри були усереднені і піддані статистичному аналізу. Дисперсії зафіксованих значень вимірювань навколо середніх значень не перевищували 4%.

До складу вимірювальної системи входили мобільний електронний індикатор LEMAG PREMETS, аналізатор відпрацьованих газів KIGAZ 300PRO, реєстратор та аналізатор вібрацій SVAN 956 й інфрачервона камера HERMO

GEAR G30. Це обладнання дозволяло знімати діагностичні дані і точно спостерігати робочі і супутні процеси (вібрації основи фундаменту і теплове випромінювання двигуна) під час різних режимів роботи двигуна і всієї пропульсивної установки.

За результатами, отриманими вимірювальною системою, оцінювався технічний стан робочого простору двигуна ендоскопічним методом і системи впорскування двигуна камерою для швидкої фіксації зображення.

Для цього використовувалися такі параметри лабораторного стенду: частота обертання колінчастого валу двигуна, тиск індикації, витрата і температура палива, витрата і температура охолоджувальної води, температура мастила, температура вихлопних газів, струм навантаження генератора (якоря), напруга на клеммах якоря генератора, вміст CO , NO_x , CO_2 , O_2 , HC у вихлопних газах, надлишок повітря, температура зовнішніх поверхонь двигуна (термограма), вібраційне прискорення.

В експерименті використовувалися суднові легкі (дистилятні) палива MGO і MDO і суднові модифіковані палива – RMG 380; RME 180; RMD 80/L і суднове дизельне паливо з наднизьким вмістом сірки RMD 80/S (вміст сірки менше 0,1% від ваги).

Газоподібні викиди досліджуваного двигуна CO / NO_x / CO_2 / O_2 / HC вимірювалися мобільним регістром. Невизначеність вимірювання не перевищувала 4%. Отримані результати апроксимували лінійними функціями, а потім усереднювали. Значення перших 30 с відкидали через обтяження грубими похибками, викликаними збуренням при проходженні вихлопних газів навколо вимірювального зонда аналізатора.

Обмеження на викиди твердих частинок (ТЧ) у вихлопних газах суднових двигунів під час їхньої роботи в експерименті не застосовуються. Однак, викиди ТЧ є важливим показником якості викидів судового палива. Радикальне скорочення викидів SO_x і NO_x у вихлопних газах суднових двигунів також сприятиме мінімізації ТЧ (шляхом застосування скрубєрів, сорбційних реакторів і каталітичних перетворювачів).

Спроба розробки відповідної технології моніторингу викидів твердих частинок у вихлопах суднових двигунів поки не вирішена. Це пояснюється тим, що додатково використана вимірювальна система відпрацьованих газів двигуна не повинна втручатися в роботу випробуваного двигуна і його штатної вимірювальної системи.

Метою вимірювання віброшвидкості на фундаменті є непряме визначення кількості енергії, що розсіюється, для виникнення вібрацій. Вона розглядається як показник стійкості двигуна під час роботи на різних видах палива. Оброблені дані вимірювань, що дають середньоквадратичне значення віброшвидкості, визначалися за допомогою середньочастотного фільтра 10 Гц-1 кГц. Невизначеність їх вимірювання не перевищувала 4%.

Середня температура поверхні двигуна в кожній серії вимірювань реєструвалася щосекунди. Невизначеність вимірювань не більше 5%.

Всі усереднені значення зафіксованих контрольних параметрів дозволили визначити енергетичні та емісійні характеристики двигуна і розрахувати обрані діагностичні параметри придатності палива до використання. Проведені випробування на усталених і перехідних процесах дозволили оцінити вплив досліджуваних судових палив на показники згоряння, викидів і економічності досліджуваного дизельного двигуна, а також на інтенсивність його зношування.

За результатами випробувань може бути прийнято рішення щодо їх перенесення для живлення повнорозмірних судових двигунів. Це вимагає проведення багатокритеріальної оцінки з використанням інструментарію дослідження операцій [12].

Складні явища характеризуються багатьма діагностичними змінними, які мають різні одиниці вимірювання та різні порядки величини. Для оцінки складного явища за набором діагностичних параметрів їх вихідні змінні нормалізують. Це дозволяє використовувати процедуру агрегування для отримання значень агрегованої змінної для побудови рейтингу системи. Впорядкування об'єктів від кращого до гіршого створює об'єктивні умови для прийняття раціональних рішень щодо їх застосування (рис. 1).

Оцінка придатності досліджуваних судових палив здійснювалася відповідно до запропонованої фізичної моделі (рис. 2). Модель мала десять діагностичних параметрів, найбільш чутливих до зміни застосовуваного палива. Роль виділених діагностичних параметрів в оцінці функціональної якості розглянутих судових палив полягала у такому [13]:

- стимулятори – параметри, що позитивно впливають на оцінку впливу палива на роботу двигуна;

- дестимулятори – параметри, що негативно впливають на оцінку впливу палива на роботу двигуна;



Рис. 1. Спрощена схема створення рейтингу об'єктів

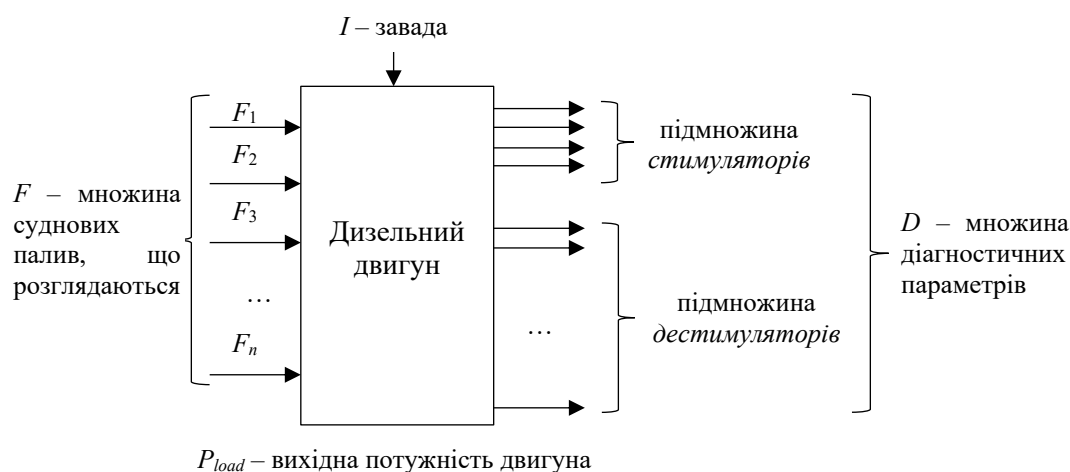


Рис. 2. Фізична модель використання палива у дизельному двигуні

– номінанти – параметри, що позитивно впливають на оцінку впливу палива на роботу двигуна тільки для номінальних значень або діапазонів.

Множину діагностичних параметрів у запропонованій фізичній моделі складається з трьох підмножин:

1) підмножини *стимуляторів*, збільшення (зменшення) значення яких сприймається як збільшення (зменшення) оцінки функціональної якості палива:

- термічного ККД двигуна, у відсотках – η_{th} ;
- інтенсивність зміни частоти обертання колінчастого валу в перехідному процесі двигуна, в $1/c^2$ – n_{tr} ;

- середня інтенсивність зміни тиску впорскування від моменту відкриття форсунки до моменту досягнення максимального тиску впорскування – Ψ_1 ;

- середня інтенсивність зміни тиску впорскування від моменту досягнення максимального тиску впорскування до моменту закінчення впорскування – Ψ_2 ;

2) підмножини *дестимуляторів*, збільшення (зменшення) значення яких сприймається як

зменшення (збільшення) оцінки функціональної якості палива:

- швидкість підвищення тиску в циліндрі, в МПа/°CSR – dp/da ;

- відсотковий внесок діоксиду вуглецю у відпрацьованих газах двигуна – CO_2 ;

- внесок оксиду вуглецю у відпрацьованих газах двигуна, в ppm – CO ;

- внесок оксидів азоту у відпрацьованих газах двигуна, в ppm – NO_x ;

- загальне, відносне кутове відхилення розпиленого струменя палива – Δ_{ang} ;

- загальне, відносне відхилення поверхні розпиленого струменя палива – Δ_{area} ;

3) підмножини *номінантів*, яка з точки зору оцінки якості палива має найбільш вигідне (номінальне) значення або повинна знаходитися в номінальному числовому діапазоні. Кожне відхилення значення номіналу від номінального або вихід за встановлені межі номінального діапазону означає зниження оцінки функціональної якості палива.

При детальному аналізі швидкість підвищення тиску dp/da в циліндрі двигуна можна розглядати як *номінальну* і вважати, що оптимальне зна-

чення цього параметра повинно бути в межах, наприклад, 0,2–0,8 МПа/°С. Тоді перевищення як нижньої межі діапазону, що означає зниження ефективності робочого процесу, так і верхньої, що свідчить про занадто «жорстку» роботу двигуна, яка призводить до надмірних навантажень на його механічну систему, означає зниження оцінки функціональної якості палива. При трактуванні цього параметра як дестимулятора передбачається, що та ж потужність двигуна досягається при його «м'якшій» (яка є бажаною) роботі.

У таблиці 1 наведено значення діагностичних параметрів та їх діапазони, визначені під час енергетичних випробувань різних видів суднових палив [1]. Аналіз результатів показав, що найкращий функціональний вплив на роботу двигуна (стимулятор) має дистилатне паливо F_6 . Однак за параметрами, значення яких повинні бути якомога нижчими (дестимулятор), найвигоднішим є паливо F_2 (залишкове). Остаточне рішення щодо найвищої експлуатаційної якості палива прийматиметься із використанням методів дослідження операцій.

Визначені діагностичні параметри (табл. 1) мають різні одиниці виміру і різні порядки величин, що потребує нормалізації їх вихідних значень до безрозмірних величин [13, 14] методом нульової унітаризації [15]. Її основою є ратіометричне перетворення, яке гарантує знаходження нормованих діагностичних параметрів у діапазоні від 0 до 1.

Нехай D_j , $j = \overline{1,10}$ – множина діагностичних параметрів, а F_i , $i = \overline{1,6}$ – множина суднових палив. Тоді визначимо [15]:

– значення діапазону для кожної стандартизованої змінної, як постійної точки відліку:

$$R(D_j) = \max d_{ij} - \min d_{ij}; \quad (1)$$

– значення стимуляторів:

$$u_{ij} = \frac{d_{ij} - \min d_{ij}}{\max d_{ij} - \min d_{ij}}; \quad (2)$$

– значення дестимуляторів:

$$u_{ij} = \frac{\max d_{ij} - d_{ij}}{\max d_{ij} - \min d_{ij}}; \quad (3)$$

– значення синтетичних змінних:

$$Q_i = \sum_{j=1}^6 u_{ij}. \quad (4)$$

За значеннями Q_i для досліджуваних суднових палив будується їхній рейтинг, відповідно до скоригованих критеріїв оцінки ефективності – енергії та якості викидів (табл. 2, рис. 3). У цьому рейтингу дистилатні палива F_5 та F_1 займають, відповідно, перше ($Q_1 = 6,455498$) і третє ($Q_2 = 4,384817$) місця, за ними йдуть модифіковані залишкові палива.

Розширення набору діагностичних параметрів зазвичай призводить до зміни позицій лідируючих дистилатних палив у рейтингу на користь модифікованих (залишкових).

Залишкове паливо F_6 зі значенням синтетичної змінної $Q_3 = 2,267845$ характеризується найнижчою функціональною якістю за прийнятими критеріями оцінки.

Висновки. Експерименти, проведені на одноциліндровому чотиритактному дизельному двигуні з природним всмоктуванням на основі шести різних суднових низькосірчистих палив, дозволили оцінити їх вплив на енергетичні та емісійні параметри і деградацію компонентів двигуна.

За одержаними експериментальними даними оцінені функціональні якості випробуваних палив і встановлено їхній рейтинг. Він дозволяє приймати раціональні експлуатаційні рішення щодо

Таблиця 1

Зведені значення вимірювань діагностичних параметрів та їх діапазони R , що характеризують функціональну якість суднових палив

і-ий вид морського палива	j-ий діагностичний параметр									
	Стимулятор				Дестимулятор					
	η_{ih}	Δn_{ir}	Ψ_1	Ψ_2	$dp/d\alpha$	CO	CO_2	NO_x	Δ_{ang}	Δ_{area}
$F_1 (MGO)$	58,75	0,095	0,0596	0,0758	0,639667	487	8,66	504	13,8	8,1
$F_2 (RMG)$	58,58	0,030	0,0617	0,0876	0,469333	364	7,95	392	73,9	49,7
$F_3 (RMD)$	59,06	0,033	0,0529	0,0568	0,49472	391	8,05	400	83,3	65,0
$F_4 (RME)$	58,80	0,032	0,0488	0,0570	0,481667	256	8,37	476	45,9	25,9
$F_5 (MDO)$	61,79	0,165	0,653	0,0700	0,613	383	8,03	542	57,4	23,8
$F_6 (RMD)$	60,07	0,043	0,0524	0,0617	0,56	421	8,57	658	71,3	53,1
$R(D_j)$	3,21	0,135	0,0165	0,0308	0,170334	231	0,71	266	69,5	56,9

Таблиця 2

Перелік стандартизованих значень діагностичних параметрів та значення синтетичної змінної, покладених в основу багатокритеріальної оцінки енергетичної та емісійної якості досліджуваних суднових палив

Морське паливо	Стандартизовані значення діагностичних параметрів										Синтетичні значення змінних Q_{i1}	Ранг палива
	Стимулятор				Дестимулятор							
	u_{i1}	u_{i2}	u_{i3}	u_{i4}	u_{i5}	u_{i6}	u_{i7}	u_{i8}	u_{i9}	u_{i10}		
F_5 (MDO)	1	1	1	0,429	0,157	0,450	0,887	0,436	0,373	0,724	6,455	1
F_2 (RMG)	0	0	0,7818	1	1	0,532	1	1	0,135	0,269	5,718	2
F_1 (MGO)	0,053	0,481	0,6545	0,617	0	0	0	0,579	1	1	4,385	3
F_4 (RME)	0,069	0,015	0	0,006	0,928	1	0,408	0,684	0,538	0,687	4,335	4
F_3 (RMD)	0,150	0,022	0,2485	0	0,851	0,416	0,859	0,970	0	0	3,516	5
F_6 (RMD)	0,532	0,096	0,2182	0,159	0,468	0,286	0,127	0	0,173	0,209	2,268	6

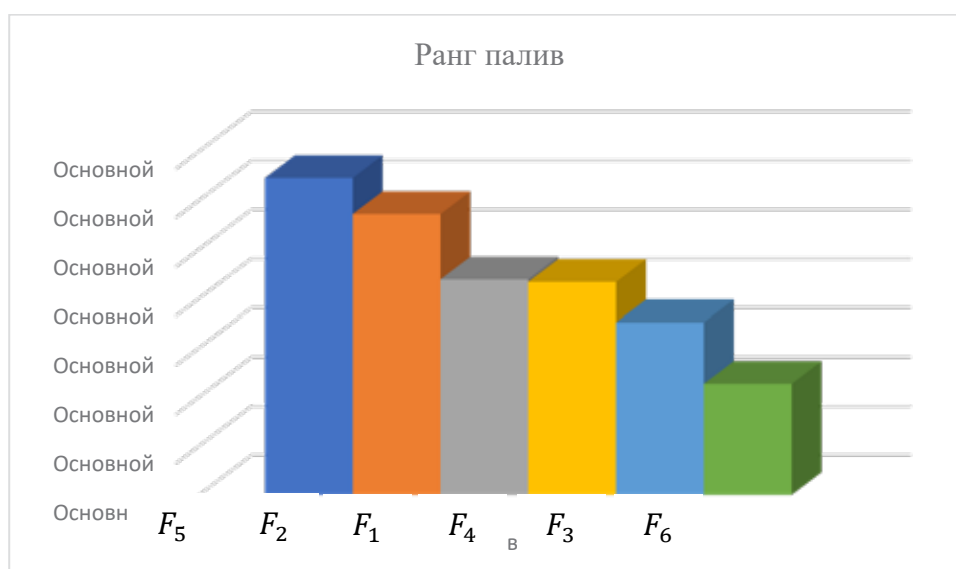


Рис. 3. Рейтинг енергетичних та емісійних властивостей досліджуваних суднових палив

подальшого застосування палив для живлення повнорозмірних суднових двигунів:

1) Дистилятне паливо MDO F_5 , застосоване у експериментальному двигуні, дає найвищий термічний коефіцієнт корисної дії $\eta_c = 61,79\%$, а залишкове паливо RMG F_2 – коефіцієнт корисної дії $\eta_c = 58,58\%$.

2) Найкращі динамічні властивості в перехідному процесі продемонстрував двигун, що працював на дистилятному паливі MDO F_5 , а найгірший показник двигун, що працював на залишковому паливі RMG F_2 .

3) Дистилятне паливо MDO F_5 створювало найсприятливіші умови роботи системи впорскування випробуваного двигуна. Найменш сприятливі умови для двигуна створювало залишкове паливо RME F_4 .

4) Найбільш сприятливий перебіг процесу згоряння найбільша швидкість підвищення тиску

в циліндрі) забезпечило залишкове паливо RMG F_2 , а найменш сприятливий – дистилятне паливо MGO F_1 .

5) Найменший викид оксиду вуглецю видавав двигун, що працював на залишковому паливі RME F_4 , а найбільший – що працював на дистилятному паливі MGO F_1 .

6) Найнижчий рівень викидів вуглекислого газу досягнутий для двигуна, що працює на залишковому паливі RMG F_2 , а найвищий – що працює на дистилятному паливі MGO F_1 .

7) Найнижчий рівень викидів оксидів азоту був досягнутий для двигуна, що працював на залишковому паливі RMG F_2 , а найвищий – для двигуна, що працював на залишковому паливі RMD F_6 .

8) Найбільш сприятливі умови роботи форсунки отримані для двигуна, що працює на дистилятному паливі MGO F_1 , а найменш сприятливі –

для двигуна, що живився залишковим паливом $RMD F_3$.

9) Найвищу функціональну якість, оцінену на основі багатокритеріального аналізу, показало дистилятне паливо $MDO F_5$, а найнижчу – залишкове паливо $RMD F_6$. При врахуванні найвищої ціни палив MDO найкращим для живлення повнорозмірних суднових двигунів слід вважати значно дешевше залишкове паливо $RMG F_2$.

Таким чином, проведені експериментальні дослідження можуть бути покладені в новітню методику випробувань новостворених суднових палив в реальних умовах експлуатації дизельного двигуна. Даний підхід дає змогу комплексно оцінити придатність різних видів палив для живлення суднових двигунів і приймати економічно обґрунтовані рішення щодо впровадження нового виду суднового палива в експлуатацію.

Список літератури:

1. Method of assessing ecological, energy and reliability effects of using modified marine fuels to power Diesel engines in real conditions / Z. Korczewski et al. *Project No. RX-10/2017*. Gdańsk University of Technology. PL, 2019.
2. Kowalski J. ANN based evaluation of the NOx concentration in the exhaust gas of a marine two-stroke diesel engine. *Polish Maritime Research*. 2009. № 16. P. 60–66. URL: <https://doi.org/10.2478/v10012-008-0023-7>.
3. Numerical analysis of emissions from marine engines using alternative fuels / M.I. Lamas et al. *Polish Maritime Research*, 2015, 22, P. 48–52. URL: <https://doi.org/10.1515/pomr-2015-0070>. (date of access: 08.10.2024)
4. A numerical and experimental study of marine hydrogen natural gas–diesel tri–fuel engines / R. Zhao et al. *Polish Maritime Research*. 2020. № 27. P. 80–90. URL: <https://doi.org/10.2478/pomr-2020-0068>. (date of access: 08.10.2024)
5. Yang Z., Tan Q., Geng P. Combustion and emissions investigation on low-speed two-stroke marine diesel engine with low sulfur diesel fuel. *Polish Maritime Research*. 2019. № 26. P. 153–161. URL: <https://doi.org/10.2478/pomr-2019-0017>. (date of access: 08.10.2024)
6. Analysis of the influence of marine fuels properties on the energy performance of a diesel engine, the reliability of its operation and the wear of its parts / Z. Korczewski et al. *Report*. 2019.
7. Study on the lubrication properties of biodiesel as fuel lubricity enhancers / Hu J et al. *Fuel*. 2005. P. 1601–1606.
8. Crutchley I. Low sulphur diesel can lead to extensive wear. *Ship & Offshore*. 2010. № 4. P. 14–17.
9. Crutchley I., Green M. Lubricity characteristics of Marine Distillate fuels. *Industrial Special Edition MTZ*. 2012. P. 58–62.
10. Guideline for the Operation of Marine Engines on Low Sulphur Distillate Diesel. *MAN Diesel & Turbo*. 2013. 23 p.
11. Korczewski Z., Marszałkowski K., Rudnicki J. The concept of research on ecological, energy and reliability effects of modified marine fuel oils application to supply compression-ignition engines in real conditions. *Combustion Engines*. 2017. № 171(4). P. 56–61.
12. Bellman R. Dynamic programming. Princeton University Press. 1957.
13. Operations research in examples and tasks / Z. Jędrzejczyk et al. Warszawa. PWN. 2011.
14. Winston W. L. Operations research: Applications and algorithms. Canada: Thomson Learning Inc., 2004. 1418 p.
15. Kukuła K. Zero unitarisation method. Warszawa: PWN, 2000.

Urum N.S., Mannapova O.V., Riashchenko O.I., Lisovskyi S.V. COMPARISON OF COMBUSTION EMISSIONS OF THE LATEST LOW-SULPHUR MARINE FUELS

The aim of the work is to develop a methodology for assessing the functional qualities of the tested fuels and establishing a rating for making rational operational decisions on their further use to power full-size marine engines. This goal is achieved by testing modified marine fuels in a classic single-cylinder four-stroke diesel engine with a modified fuel supply system on a laboratory bench under real-world conditions of compression-ignition engine operation and analysing the results. Comparable test conditions are achieved by changing the lubricant and fuel injector tips before each engine test on a different fuel. For the comparative analysis of the tested marine fuels, the control parameters are recorded at the same reference engine load in three/four series of measurements. Based on the results of the measurements, it is possible to build a Sankey diagram, a histogram of the volume fractions of harmful and toxic gases in the engine exhaust gases and characteristic efficiency of energy processes. The measuring system allows for the acquisition of diagnostic data and accurate observation of operating and related processes during various modes of operation of the engine and the entire

propulsion system. Based on the results obtained by the measuring system, the technical condition of the working space and the engine injection system was assessed. Based on the results of the tests, a decision can be made to transfer them to power full-size marine engines based on a multi-criteria assessment using operations research tools. To evaluate a complex phenomenon by a set of diagnostic parameters, the output variables were normalised, which allows the aggregation procedure to be applied to obtain the values of the aggregated variable for building the system rating. To evaluate the suitability of the studied marine fuels, a physical model of the diagnostic parameters that are most sensitive to changes in the fuel used is proposed. The selected diagnostic parameters were divided into stimulants, destimulants and nominators.

Key words: *physical model, exhaust gases, method, diesel engine, rating, stimulator, destimulator, nominee.*