

amplitude instability of crankshaft speed oscillations while maintaining an acceptable level of thermal regime stability. This optimization improved diesel engine stability and reduced specific effective fuel consumption by 1.5 – 4.3 % in main operational modes. The recommendations presented in this work regarding ESG adjustment can be used in the operation of marine diesel engines to enhance their stability.

Key words: marine diesel engine; indicator torque; speed stability; speed governor; sea disturbance.

УДК 629.5:621.436

DOI: 10.20998/0419-8719.2025.1.06

Б. Г. Тимошевський, М. Р. Ткач, О. М. Попов

МОТОРНІ ВЛАСТИВОСТІ АЛЬТЕРНАТИВНИХ ПАЛИВ, ОТРИМАНИХ ШЛЯХОМ ПЕРЕРОБКИ ПОЛІМЕРНИХ ВІДХОДІВ

Основною метою роботи є оцінка ефективності раціональної технології переробки термопластичних полімерних відходів у моторні палива. Впровадження такої технології дозволить залучити до енергетичного балансу певну кількість ресурсів, які не застосовувалися раніш, а також утилізувати зазначені відходи достатньо екологічним засобом. На теперішній час впровадження альтернативних моторних палив є одним з шляхів вирішення проблеми забезпечення енергетичними ресурсами транспорту та стаціонарної енергетики. Однією з можливих видів сировини є відходи термопластичних полімерів. Ця сировина має декілька суттєвих переваг перед нафтою: практична відсутність сірки, ванадію, важких вуглеводнів, смол, нафтових кислот та низькі інші небажані компоненти. Розглянуто основні моторні властивості альтернативних палив, отриманих з відходів переробки термопластичних полімерів. Встановлено, що шляхом вибору раціональної схеми технологічного процесу переробки, очищення можна отримати бензинове, дизельне, важке дизельне та котельне паливо. Встановлено, що шляхом вибору раціональних параметрів процесу переробки можна налаштовувати обладнання з метою отримання переважної кількості певного продукту. Показано, що їх техніко-хімічні властивості дозволяють використовувати ці палива в теплових двигунах без суттєвих змін двигуна та паливної системи. Наведено принципову технологічну схему процесу отримання альтернативного палива з пластикових відходів, основні моторні властивості та вихід товарного палива. Визначено, що властивості такого альтернативного палива за відповідних технологічних параметрів можуть бути дуже близькими до стандартних палив. Індикаторні діаграми наведені для двигуна 6ЧН12/14 при роботі на стандартному та альтернативному дизельному паливі. Визначені рівні тиску в циліндрі двигуна, питома ефективна витрата палива, вміст монооксиду вуглецю (CO) та оксидів азоту (NO_x) у випускних газах, а також швидкість зростання тиску $dP/d\phi$ в циліндрі при роботі на конвенційному дизельному паливі по ДСТУ 7688:2015 та альтернативному паливі. Показано, що використання зазначеного альтернативного палива не потребує суттєвих змін в конструкції двигуна та для досягнення прийнятних показників можна обмежитися відповідним налаштуванням паливної апаратури. Тому, на наш погляд, можна сподіватися на достатньо ефективне використання такого палива з енергетичної та екологічної точки зору.

Ключові слова: технологічний процес; моторні властивості; альтернативні види палива; відходи термопластичних полімерів; теплові двигуни; індикаторна діаграма.

Вступ

Залучення до енергетики нових альтернативних енергоресурсів є надзвичайно актуальною проблемою для ефективного функціонування економіки. Особливо важливим є використання альтернативних енергоресурсів та їх диверсифікація в умовах нестабільності цін на нафтові палива, виснаження запасів вуглеводневої сировини та політичної кон'юнктури. Одним з перспективних енергоресурсів є альтернативні моторні палива, які можуть бути отримані з відходів термопластичних полімерних матеріалів.

На теперішній час світове співтовариство накопичило більше 8 млрд. т полімерних відходів, стан яких не дозволяє використовувати їх для виробництва вторинних полімерних товарів. Нажаль кількість таких відходів з кожним роком збільшується приблизно на 150 млн. т. Забруднення відходами поліме-

рів спостерігається не тільки на суходолі, а вже поширилося й на Світовий океан. З іншого боку полімерні відходи уявляють собою вуглеводневу сировину, яка може бути використана для виробництва альтернативних моторних палив.

При використанні ефективних та екологічно безпечних технологій виробництво альтернативних моторних палив (бензинів, дизельних та мазутів) з полімерних відходів може забезпечити до 5...7% світового споживання рідких моторних палив. Одночасно вирішується інша важлива проблема – зниження навантаження на довкілля шляхом утилізації цих відходів, які дуже стійкі до впливу природних чинників та не розкладаються сотні років.

Таким чином дослідження в галузі виробництва моторних палив з відходів термопластичних полімерів та одночасна утилізація цих відходів є акту-

альною задачею, вирішення якої буде сприяти покращенню паливно-енергетичного балансу та захисту навколишнього середовища.

Аналіз публікацій

Найбільшу увагу вирішенню цієї проблеми приділяють такі промислово розвинені країни як США, Німеччина, Японія та інші, де на теперішній час активно ведуться науково-дослідні та проектно-конструкторські роботи зі створення промислових технологій та обладнання для утилізації полімерних відходів та рекуперації енергії технологічного процесу. Слід зазначити, що на теперішній час практично всі дослідники відійшли від циклічних технологічних процесів, а зосередилися на безперервних технологіях. Практично всі технології передбачають використання додаткових енергоносіїв у вигляді природного газу та виробництво теплової або електричної енергії по циклу Ренкіна. Однак у цих дослідженнях, на жаль, не приділяється суттєва увага якості продукту, який утворюється в результаті переробки полімерних відходів та можливості використання цих продуктів у вигляді палива для теплових двигунів.

Ефективна утилізація та переробка полімерних відходів потребує досить глибокого розуміння процесів, які відбуваються. В роботах [1,2] достатньо повно розглянуті процеси та визначені основні фізико-хімічні перетворення речовин при термічній обробці у широкому температурному діапазоні. Ці та інші дослідження в зазначеному напрямку створили основи розуміння перетворень, які відбуваються в процесі піролізу та крекінгу термопластичних полімерів та створили можливість для подальшого розвитку технологій.

Автори джерела [3] виконали дуже ретельне бібліографічне дослідження, яке дозволяє проаналізувати останні публікації стосовно використання продуктів переробки полімерних відходів у ДВЗ з примусовим запаленням. Аналіз цієї публікації дозволяє зробити висновок, що на теперішній час проблемі виробництва та використання штучних палив, отриманих в результаті переробки полімерних відходів особлива увага приділяється в країнах південної Азії. Показано, що одним з найкращих репозитаріїв публікацій з зазначеної проблеми є Scopus.

В роботах [4, 5] автори зробили спробу розробки технологій отримання штучного вуглеводневого продукту шляхом піролізу, техніко-хімічні показники якого не дозволяють використовувати його у якості дизельного палива. Було запропоновано використати зазначений продукт як невелику домішку до дизельного палива. Проведені експериментальні дослідження показали що зазначені паливні суміші

при різних навантаженнях двигуна впливають на викиди CO, NOx, HC та непрозорість диму. Вища непрозорість диму, отримана в сумішах з дизельним паливом, може бути наслідком погіршення якості розпилення, що більшим розміром молекул домішок.

Аналіз результатів робіт [6, 7] дозволяє зробити висновок про проблеми, що виникають при отриманні штучного палива задовільної якості методом піролізу завдяки нестабільності хімічного складу зазначеного палива а також збільшення викидів оксидів азоту. Однак дослідники відзначають, що при вдосконаленні технології переробки можна отримати достатньо якісне пальне для дизельних ДВЗ.

Роботи [8, 9] присвячені хроматографічним дослідженням бензинових фракцій C₈–C₁₂ отриманих в результаті переробки поліетилену високої та низької щільності. Показано, що на якість палива має досить значний морфологічний склад полімерних відходів, що потребує корегування режимів роботи обладнання для отримання бензинового та дизельного палива задовільної якості. Крім того автори звертають увагу на раціональний температурний режим роботи реакторів піролізу, який критично впливає на якість штучного палива, енергетичні витрати на процес переробки та екологічні показники виробництва.

Роботи [10, 11] присвячені проблемам масштабованого виробництва штучного палива з промислових та побутових полімерних відходів. Показано, що для досягнення задовільної якості палива все ж є необхідним попереднє сортування відходів з метою зменшення присутності у сировині термореактивних полімерів, а також полімерних матеріалів, які містять галогенові елементи. Показано, що при масштабній переробці полімерних відходів слід особливу увагу звернути на зменшення викидів оксиду та діоксиду вуглецю.

У фінальній доповіді Європейської комісії [12] визначені основні найбільш ефективні шляхи щодо переробки полімерних відходів у штучні моторні палива, раціональні масштаби виробництва, розташування потужностей, сировинної бази та визначені загальні вимоги до екологічної безпеки. Особлива увага приділена ефективності переробки полімерів, які містять галогенові компоненти. Ці дослідження дозволяють здійснити раціональний підхід при виборі технології переробки, забезпечити вимоги технічних стандартів на штучне паливо та захистити навколишнє середовище від можливого негативного впливу виробництва.

Аналіз публікацій дає змогу зробити висновок, що на теперішній час не вдалося знайти достатньо

повних та надійних даних щодо ефективних технологій переробки полімерних відходів у якісні моторні палива. Представлені в літературі технології на основі піролізу представляються не достатньо ефективними як енергетичної, так й екологічної точки зору. Вирішення зазначеної проблеми може бути досягнуте за рахунок використання каталітичного керованого крекінгу та раціональних параметрів цього процесу.

Крім того, в літературних джерелах недостатньо повно висвітлені особливості робочих процесів, які відбуваються в ДВЗ при використанні штучних палив, отриманих в результаті переробки полімерних відходів.

Зазначене вище дає змогу вважати, що дослідження в напрямку вдосконалення технології виробництва моторних палив з полімерних відходів та дослідження робочих процесів ДВЗ при експлуатації на таких паливах є актуальними.

Мета дослідження

Метою роботи є визначення раціональної принципової технологічної схеми виробництва альтернативного моторного палива, властивості якого дозволяють його використання в дизельних двигунах без корегування конструкції або інших суттєвих втручаннях в системи та агрегати цього двигуна.

Методика проведення дослідження

Методика дослідження структури технологічної схеми виробництва альтернативного палива з відходів термопластичних полімерів базується на теорії технічних систем та системному аналізі з використанням відповідного математичного апарату.

Об'єкт дослідження – процеси, які відбуваються в технологічному обладнанні для виробництва альтернативного палива та двигуні внутрішнього згоряння, а також зв'язків між ними.

Предмет дослідження – параметри та характеристики процесів у відповідних апаратах та системах задіяних у виробництві альтернативного палива та двигуні внутрішнього згоряння.

Задачі дослідження. Досягнення поставленої мети реалізується шляхом вирішення наступних завдань:

1. Проаналізувати існуючі схеми відомих технологічних схемних та конструктивних рішень щодо виробництва альтернативних палив з відходів термопластичних полімерів.
2. Визначити раціональні схемні, технічні та конструктивні рішення, які забезпечать задовільні властивості альтернативного палива.
3. Експериментальним шляхом отримати зразки альтернативного палива та визначити його техніко-хімічні та моторні властивості.

4. Оцінити можливість впровадження отриманих результатів у виробництво альтернативних палив з полімерної сировини.

Виробництво альтернативних палив шляхом переробки термопластичних полімерів за традиційними технологіями характеризується значною складністю як процесу самого процесу та апаратного забезпечення, так й значною вартістю обладнання та, відповідно, коштовністю кінцевого продукту.

Визначення раціональної технологічної схеми виробництва та складу обладнання, які забезпечують отримання альтернативного палива, властивості якого дозволяють його використання у теплових двигунах, є визначальними при впровадженні такої технології у промислове виробництво.

Таким чином визначення доцільної структури технологічної схеми, апаратного складу, її параметрів є актуальною науково-технічною задачею.

Результати дослідження

В лабораторії перспективних енергетичних технологій розроблений та реалізований технологічний процес, який дозволяє отримувати альтернативні моторні палива з відходів полімерних матеріалів, ринкова вартість яких буде суттєво нижчою від вартості стандартних нафтових палив при задовільних моторних властивостях.

Спираючись на досвід наукових та експериментально-конструкторських робіт, які проводилися на протязі останніх років, найбільш доцільним був визнаний технологічний процес отримання альтернативних палив з полімерної сировини шляхом контрольованого крекінгу, що відрізняється відповідним апаратним оформленням та параметрами від відомих рішень.

Спрощена принципова схема цього технологічного процесу захищена патентом України [12] та представлена на рисунку 1.

Зазначене рішення складається з двох послідовних технологічних ліній: декомпозиції відходів термопластичних полімерів та отримання рідких вуглеводнів (поліолефінів або альтернативної нафти) з цієї сировини та нафтоперегінної частини, яка дозволяє отримати із зазначеної сировини моторні палива задовільної якості. Найбільш важливим при реалізації наведеної технології є вибір та підтримання параметрів процесу декомпозиції, який повинен забезпечити отримання рідких вуглеводнів з дуже низьким вмістом важких фракцій (фенолів, альдегідів, жирних кислот тощо), а також вуглеводнів, що містять галогенові. Досягнення таких показників процесу декомпозиції дозволяє використовувати в наступній ректифікаційній лінії мінімальний стандартний набір технологічного обладнання та не засто-

совувати дороге та енергоємне обладнання для платформінгу, деасфальтизації, депарафінізації, гідроочищення тощо. Такий підхід дозволяє суттєво знизити капітальні витрати на створення виробництва

та вартість альтернативних моторних палив та, таким чином підвищити їхню конкурентоспроможність [13].

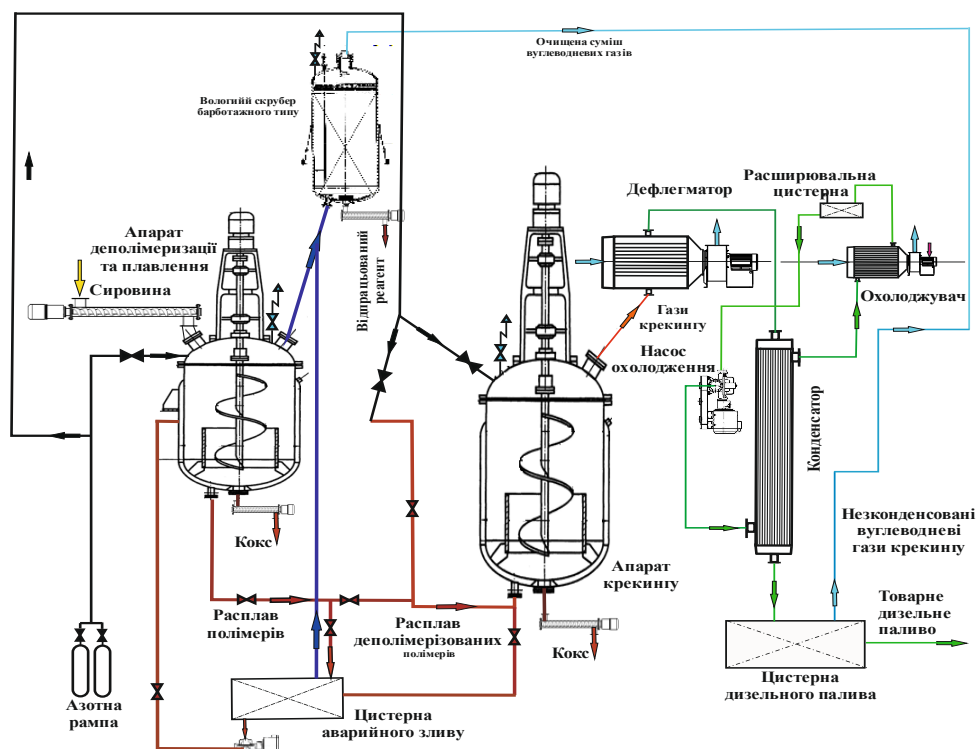


Рис. 1. Спрощена принципова схема технологічного процесу отримання альтернативного дизельного палива з відходів термопластичних полімерів

Основні показники технологічного процесу, реалізованого на експериментальній установці Центру перспективних енергетичних технологій Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова, наведено у таблиці 1.

Таблиця 1.

Показники	
Выход технологических продуктов	
Кількість сировини, кг/добу	155
Газ крекінгу, м ³ /добу	9,5
Бензин, ОЧ 76, кг/добу	45,0
Дизельне паливо, ЦЧ 45, кг/добу	78,0
Котельне паливо, кг/добу	15,0
Витрати енергії	
Встановлена електрична потужність, кВт	10,0
Електрична потужність, кВт	7,0
Енергоємність переробки, (кВт×год)/кг	1,2
Споживання води (підпитка), кг/добу	1,5
Відходи	
Коксовий залишок, кг/добу	6,25
Минеральний остаток, кг/добу	1,0

Рациональні параметри процесу деструкції відходів термопластичних полімерів дозволили отримати альтернативні бензин та дизельне паливо, близькі за складом до стандартних палив ДСТУ 7687:2015 та ДСТУ 7688:2015, відповідно. бензинової фракції. У таблиці 4 наведено властивості альтернативного дизельного палива.

У таблицях 2 та 3 наведено основні моторні властивості, структурно-груповий та гомологічний склад бензинової фракції, а на рисунку 2 – хроматомас-спектрограма Аналіз даних, наведених у таблицях 2-4 та рисунку 2, дає підставу припустити, що при використанні альтернативних палив, отриманих з відходів термопластичних полімерів в дизельних двигунах, не слід очікувати істотних порушень робочого процесу та зміни основних характеристик двигунів в цілому.

Слід зазначити, що за фракційним складом, масовою часткою сірки, концентрацією фактичних смол, вмістом парафінових та деяким іншим показникам альтернативні палива перевершують аналогічні показники стандартних палив. Деяке збільшення кислотного числа, невисоке октанове число та знижена щільність не є перешкодою для використання цих палив у теплових двигунах.

Таблиця 2.

Показники	
Октанове число по моторному методу	76
Фракційний склад	
Температура начала перегонки, К	320
10% переганяється при температурі, К	353
50% переганяється при температурі, К	406
90% переганяється при температурі, К	464
Залишок в колбі	1,4
Втрати	2,5
Кислотність, мг КОН на 100 см ³ палива	8,31
Масова доля сірки, %	0,006
Випробування на мідній пластині	+
Йодне число, г. йоду на 100 см ³ палива	78,4
Вміст ненасичених вуглеводнів, по йодному числу	31,8
Щільність при температурі 20 °С, кг/м ³	711,7
Теплотворна спроможність, МДж/кг	44,1

Таблиця 3.

Вуглеводні	%
Парафіни,	39,4
Пропан	—
Бутани	0,79
Пентани	7,54
Гексани	8,00
Гептани	8,22
Октани	5,17
Нонани	4,14
Декани	3,33
Ундекани	2,71
Моноолефіни	38,6
Диени и цикломоноолефіни	16,9
Алкилбензоли	3,1
Алкенилбензоли	2,0
Середня молекулярна маса	103,0

Враховуючи, що зазначені альтернативні палива не піддавалися додатковій обробці та не містять жодних присадок, подальше поліпшення їх властивостей, у разі потреби, може бути досягнуто за рахунок введення відповідних домішок.

З метою визначення показників робочого процесу при використанні альтернативного дизельного палива, отриманого в результаті утилізації полімерних відходів, були виконані експериментальні дослідження на двигуні 6ЧН 12/14 та результати цих досліджень представлені на рисунках 3-8.

Аналіз результатів досліджень, наведених на рис.3...5, дозволяють стверджувати, що відмінності в параметрах робочого процесу в дизельному двигуні 6ЧН12/14 не є суттєвими. Перевищення максимального тиску в циліндрі двигуна (рис. 3) на мак-

симальних навантаженнях не виходить за межі допустимих значень (1...3%). Деяке підвищення жорсткості роботи (рис. 4) не призводить до порушення робочого процесу та пояснюється присутністю в дизельному паливі бензинових фракцій.

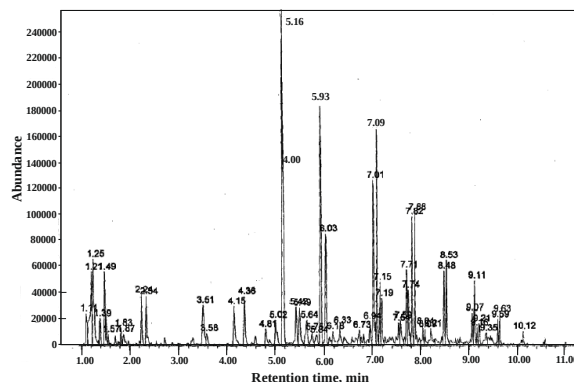
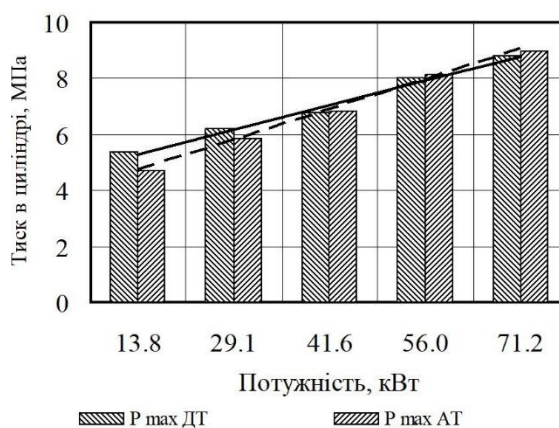
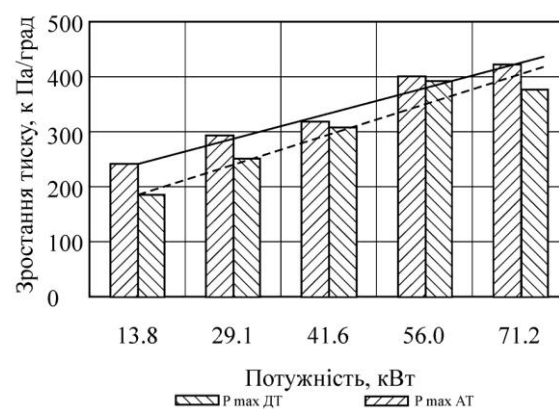


Рис. 2. Хромато-мас-спектрограма бензинової фракції альтернативного палива


Рис. 3. Величини тиску в циліндрі двигуна 6ЧН12/14 при роботі на:
----- стандартному дизельному паливі;
———— альтернативному дизельному паливі

Рис. 4. Величина зростання тиску в циліндрі двигуна 6ЧН12/14 при роботі на:
----- стандартному дизельному паливі;
———— альтернативному дизельному паливі

Низьке октанове число бензинових фракцій та кислотність дизельних фракцій можуть бути відкриті за рахунок відповідних домішок, які широко використовуються у нафтохімічній промисловості.

Питома ефективна витрата палива (рис. 5) при роботі на альтернативному дизельному паливі практично не відрізняється від аналогічного показника при роботі на стандартному дизельному паливі. Деяке зниження питомої витрати (3...5%) спостерігається лише у сфері навантажень, близьких до номінальних.

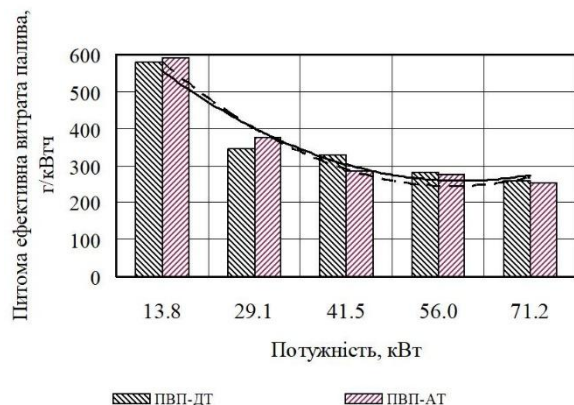


Рис. 5. Питома ефективна витрата палива двигуна 6ЧН12/14 при роботі на:
----- стандартному дизельному паливі;
—— альтернативному дизельному паливі

Вміст у випускних газах монооксиду вуглецю (рис. 6) при експлуатації двигуна на альтернативному паливі істотно відрізняється (практично вдвічі) від аналогічного показника при роботі на стандартному паливі в області малих та максимальних навантажень. Це свідчить про задовільну організацію робочого процесу у двигуні, що використовує альтернативне паливо та про те, що немає необхідності коригування параметрів паливopодачі на режимах малої та максимальної потужностей.

Вміст оксидів азоту у випускних газах двигуна (рис. 7) під час роботи альтернативному паливі та малих навантажень на 20...45% перевищує аналогічний показник під час експлуатації двигуна на стандартному дизельному паливі. Це також свідчить про необхідність коригування параметрів паливopодачі та повітропостачання на цих навантаженнях. У разі середніх та близьких до номінальних навантажень, спостерігається зниження вмісту оксидів азоту на 15...25%, що є позитивним, враховуючи, що у цій галузі такі є основні експлуатаційні режими роботи двигуна.

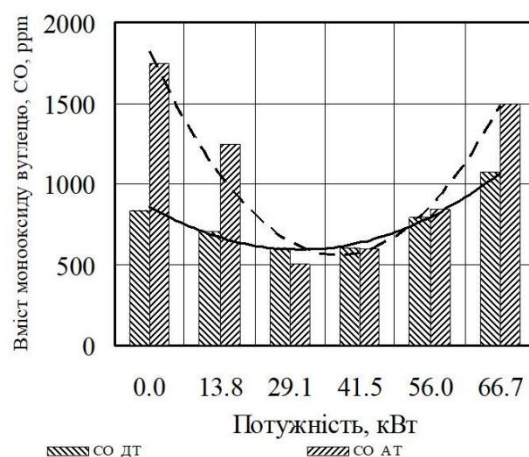


Рис. 6. Вміст монооксиду вуглецю (CO) у випускних газах двигуна 6ЧН12/14 при роботі на:
----- стандартному дизельному паливі по;
—— альтернативному дизельному паливі

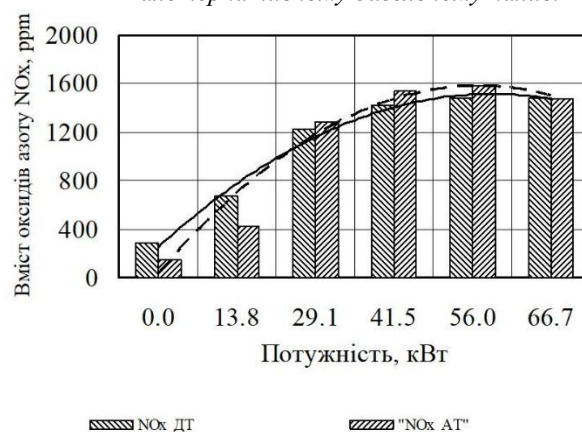


Рис. 7. Вміст оксидів азоту (NO_x) у випускних газах двигуна 6ЧН12/14 при роботі на:
----- стандартному дизельному паливі по ДСТУ 7688:2015;
—— альтернативному дизельному паливі

На рис. 8 та 9 наведені індикаторні діаграми та швидкості наростання тиску в циліндрі двигуна 6ЧН12/14 при роботі на стандартному та альтернативному дизельному паливі при різних навантаженнях. З малюнка видно, що на режимах великих навантажень значення максимального тиску $P_{\max}$ та максимальної швидкості наростання тиску dp/d при використанні альтернативного дизельного палива дещо менші, ніж для стандартного дизельного палива. При роботі двигуна на альтернативному паливі при потужності генератора 71 кВт та частоті обертання 1500 хв^{-1} зростає швидкість наростання тиску, яка перевищує аналогічний показник для дизельного палива на 0,5 МПа. Абсолютне значення підвищення максимального тиску становить 0,45 МПа, а середнього на 0,3 МПа в порівнянні з роботою двигуна на дизельному паливі.

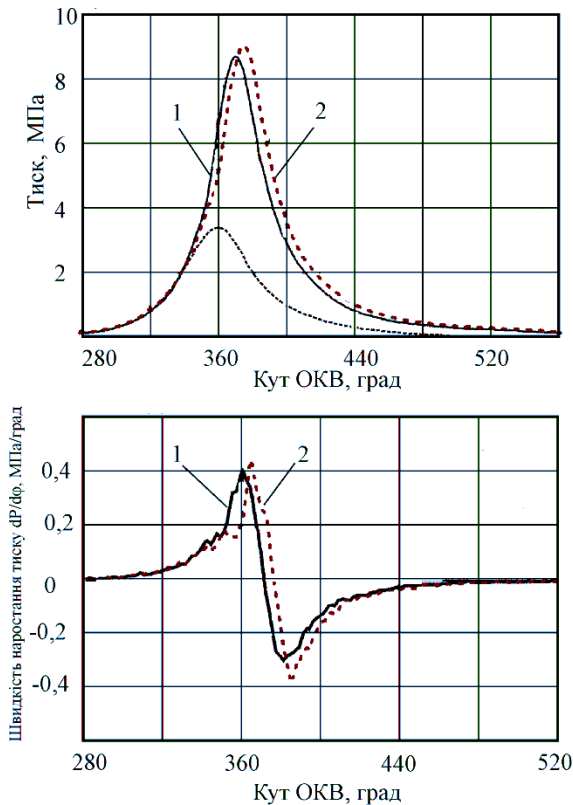


Рис. 8. Індикаторна діаграма та швидкість наростання тиску $dP/d\phi$ в циліндрі двигуна 6CH12/14 при $N_e=71$ кВт і 1500 хв⁻¹ та роботі на:
 - - - - - стандартному дизельному паливі;
 — альтернативному дизельному паливі

Однак зі зменшенням навантаження період затримки займання при використанні альтернативного дизельного палива ще більше перевищує аналогічний показник для стандартного палива (різниця становить 3,8 град. о.к.в. при навантаженні 20%). Внаслідок чого більш висока швидкість згоряння палива в початковий період не призводить до зростання $P_{\max}$ та пізнішого початку займання та розвитку процесу згоряння. Так, при роботі на середніх навантаженнях період затримки займання альтернативного палива більший, ніж у дизельного палива приблизно на 1,8 град. о.к.в. та приблизно однаковому $P_{\max}$, абсолютне значення підвищення максимального тиску становить 0,05 МПа. На режимах 20% до 40% навантаження значення максимального тиску в циклі при роботі на альтернативному паливі стає менше, ніж цей показник при роботі на дизельному паливі.

Це пояснюється тим, що паливо з високим цетановим числом, за інших рівних умов, має кращу здатність до самозаймання.

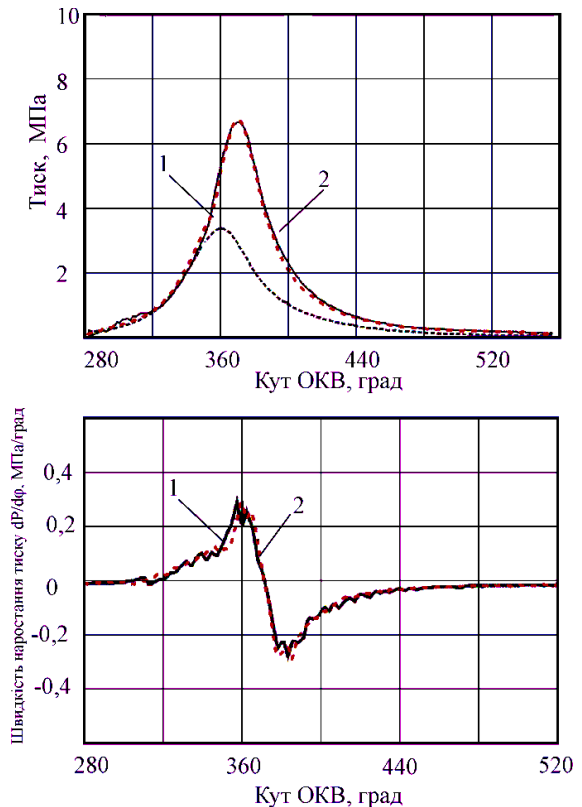


Рис. 9. Індикаторна діаграма та швидкість наростання тиску $dP/d\phi$ в циліндрі двигуна 6CH12/14 при $N_e=42$ кВт і 1500 хв⁻¹ та роботі на:
 - - - - - стандартному дизельному паливі;
 — альтернативному дизельному паливі

Альтернативне дизельне паливо з пониженим цетановим числом більше випаровується та активується, отже, велика частка цього палива буде перебуває в збудженому стані, але горить переважно в гетерогенному середовищі, не отримавши належної активації. Це негативно позначається на якості згоряння. Двигун працює з підвищеною витратою палива, зниженою потужністю та підвищеною димністю. З іншого боку, разом із збільшенням періоду затримки займання, негативна робота циклу до ВМТ збільшується, максимальний тиск газів не досягає свого оптимального значення. Внаслідок цього відбувається зниження індикаторного ККД. Найбільша частина тепловиділення відбувається на такті розширення, тому ефективність використання теплоти, що виділяється та повнота згоряння знижуються, зростають втрати тепла з відпрацьованими газами, зменшуються індикаторний, механічний та ефективний ККД, знижуються потужність та погіршуються економічність дизеля, зростає питома ефективна витрата палива.

Висновки

На підставі проведених досліджень можна вважати, що ефективна переробка полімерних відходів у моторні палива, фізико-хімічні властивості яких дозволяють застосовувати їх у ДВЗ, досягається за рахунок використання технології каталітичного керованого крекінгу. Крім того використання підходів полімерів для виробництва товарного моторного палива може сприяти зменшенню забруднення навколишнього середовища зазначеними відходами.

Дослідження також показали принципову можливість роботи дизельного двигуна на альтернативному паливі, отриманому шляхом переробки відходів термопластичних полімерів. При цьому не потрібно внесення суттєвих змін в конструкцію двигуна, його агрегатів та систем. Для забезпечення ефективної роботи двигуна достатнім є відповідне налаштування паливної апаратури. При цьому параметри робочого процесу та динаміка тепловиділення залежать від цетанового числа палива та від кількості ароматичних вуглеводнів, що містяться у ньому.

Для зменшення негативного впливу зазначених факторів на робочі показники двигуна необхідно регулювати кут випередження подачі палива в межах 15...75 град. о.к.в. залежно від технохімічних властивостей альтернативного дизельного палива. Це дозволить забезпечити тривалу роботу двигуна на альтернативному паливі зі зниженим цетановим числом при задовільному витраті палива.

Список літератури:

1. Soni V. Thermochemical Recycling of Waste Plastics by Pyrolysis: A Review / V. Soni, G. Singh, B. K. Vijayan, A. Chopra, G. S. Kapur, S. S. V. Ramakumar // *Energy & Fuels*. – 2021. – Vol. 35, No. 16. – P. 12763–12808. – DOI: 10.1021/acs.energyfuels.1c01292.
2. Das P. The effect of slow pyrolysis on the conversion of packaging waste plastics (PE and PP) into fuel / P. Das, P. Tiwari // *Waste Management*. – 2018. – Vol. 79. – P. 615–624. – DOI: 10.1016/j.wasman.2018.08.021.
3. Syamsiro M. Utilization of waste polyethylene pyrolysis oil as partial substitute for diesel fuel in a DI diesel engine / M. Syamsiro, H. Saptoadi, M. Kismurtono, Z. Mufrodi, K. Yoshikawa // *International Journal of Smart Grid and Clean Energy*. – 2019. – Vol. 8, No. 1. – P. 38–47. – DOI: 10.12720/sgce.8.1.38-47.
4. Kanchan S. Use of waste plastic oil as a fuel in reactivity-controlled compression ignition engines: a bibliometric investigation from 2017–23 / S. Kanchan, S. S. Sandhu // *Clean Energy*. – 2024. – Vol. 8, Issue 3. – P. 206–222. – DOI: 10.1093/ce/zkae004.
5. Armenise S. Plastic Waste Recycling via Pyrolysis: A Bibliometric Survey and Literature Review/ S. Armenise, W. S. Luing, J. Ramirez, F. Launay, D. Wuebben, N. Ngadi, J. Rams, M. Muñoz // *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*. – 2021. – Vol. 158. – Article 105265. – DOI: 10.1016/j.jaap.2021.105265.
6. Sathasivam D. The Result of Nano-Additives in Diesel Engine using Diesel-E Waste Plastics Pyrolysis Oil Fuel Blends: A Review / D. Sathasivam, K. Kumar, L. Gokul, S. Boobalan // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. –

2020. – Vol. 764. – Article 012042. – DOI: 10.1088/1757-899X/764/1/012042.
7. Wathakit K. Fuel Properties, Performance and Emission of Alternative Fuel from Pyrolysis of Waste Plastics / K. Wathakit, S. Ekarong, S. Maithomklang, J. Srisertpol // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. – 2020. – Vol. 717. – Article 012001. – DOI: 10.1088/1757-899X/717/1/012001.
8. Jahiding M. and physical properties of plastic fuel from high and low-density polyethylene waste produced by pyrolysis method / M. Jahiding, I. Usman, R. Rizki, E. Hasan, M. Mashuni // *AIP Conference Proceedings*. – 2023. – Article 020013. – DOI: 10.1063/5.0123561.
9. Herrapstanti E. Fuel from plastic waste using the pyrolysis method / E. Herrapstanti, M. Ashraf, R. Wahyusari, D. Alfreda // *BIS Energy and Engineering*. – 2024. – Vol. 1. – Article V124011. – DOI: 10.31603/biseeng.34.
10. The American Chemistry Council. *Plastics-To-Fuel Project Developer's Guide* [Електронний ресурс]. – Ocean Recovery Alliance, 2015. – Режим доступу: <https://www.americanchemistry.com/content/download/8085/file/2015-Plastics-to-Fuel-Project-Developers-Guide.pdf>.
11. Sambandam Padmanabhan Energy recovery of waste plastics into diesel fuel with ethanol and ethoxy ethyl acetate additives on circular economy strategy / Sambandam Padmanabhan, K. Giridharan, Balasubramaniam Stalin, Subramanian Kumaran, V. Kavirmani, N. Nagaprasad, Leta Tesfaye Jule, Ramaswamy Krishnaraj. // *Scientific report*, 29 March, 2022. Режим доступу: <https://doi.org/10.1038/s41598-022-09148-2>.
12. Тимошевський Б. Г., Ткач М. П., Харитонов Ю. М. Спосіб та пристрій для переробки відходів полімерів у альтернативне паливо: пат. UA 73900 C2. Україна, МПК B29B 17/00, C10G 1/00 – Режим доступу: <https://worldwide.espacenet.com/publicationDetails/biblio?CC=UA&NR=73900C2>.
13. Тимошевський Б. Г., Ткач М. П. Моторні палива з полімерної сировини: Виробництво та застосування/ День печаті. – Київ: Київ Прес День, 2011. – 352 с.

Bibliography (transliterated):

1. Soni, V., Singh, G., Vijayan, B.K., Chopra, A., Kapur, G.S. and Ramakumar, S.S.V. (2021). Thermochemical recycling of waste plastics by pyrolysis: A review. *Energy & Fuels*, 35(16), pp.12763–12808. doi:10.1021/acs.energyfuels.1c01292.
2. Das, P. and Tiwari, P. (2018). The effect of slow pyrolysis on the conversion of packaging waste plastics (PE and PP) into fuel. *Waste Management*, 79, pp.615–624. doi:10.1016/j.wasman.2018.08.021.
3. Syamsiro, M., Saptoadi, H., Kismurtono, M., Mufrodi, Z. and Yoshikawa, K. (2019). Utilization of waste polyethylene pyrolysis oil as partial substitute for diesel fuel in a DI diesel engine. *International Journal of Smart Grid and Clean Energy*, 8(1), pp.38–47. doi:10.12720/sgce.8.1.38-47.
4. Kanchan, S. and Sandhu, S.S. (2024). Use of waste plastic oil as a fuel in reactivity-controlled compression ignition engines: a bibliometric investigation from 2017–23. *Clean Energy*, 8(3), pp.206–222. doi:10.1093/ce/zkae004.
5. Armenise, S., Luing, W.S., Ramirez, J., Launay, F., Wuebben, D., Ngadi, N., Rams, J. and Muñoz, M. (2021). Plastic waste recycling via pyrolysis: A bibliometric survey and literature review. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 158, Article 105265. doi:10.1016/j.jaap.2021.105265.
6. Sathasivam, D., Kumar, K., Gokul, L. and Boobalan, S. (2020). The result of nano-additives in diesel engine using diesel-E waste plastics pyrolysis oil fuel blends: A review. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 764, Article 012042. doi:10.1088/1757-899X/764/1/012042.
7. Wathakit, K., Ekarong, S., Maithomklang, S. and Srisertpol, J. (2020). Fuel properties, performance and emission of alternative fuel from pyrolysis of waste plastics. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 717, Article 012001. doi:10.1088/1757-899X/717/1/012001.
8. Jahiding, M., Usman, I., Rizki, R., Hasan, E. and Mashuni, M. (2023). Chemical and physical properties of plastic

fuel from high and low-density polyethylene waste produced by pyrolysis method. AIP Conference Proceedings, Article 020013. doi:10.1063/5.0123561. 9. Herrapstanti, E., Ashraf, M., Wahyusari, R. and Alfreda, D. (2024). Fuel from plastic waste using the pyrolysis method. BIS Energy and Engineering, 1, Article V124011. doi:10.31603/biseeng.34. 10. The American Chemistry Council. (2015). Plastics-To-Fuel Project Developer's Guide. [online] Ocean Recovery Alliance. Available at: <https://www.americanchemistry.com/content/download/8085/file/2015-Plastics-to-Fuel-Project-Developers-Guide.pdf> [Accessed 3 Jun. 2025]. 11. Sambandam Padmanabhan, K. Giridharan, Balasubramaniam Stalin, Subramanian Kumaran, V. Kavimani, N. Nagaprasad, Leta Tesfaye Jule,

Ramaswamy Krishnaraj. Energy recovery of waste plastics into diesel fuel with ethanol and ethoxy ethyl acetate additives on circular economy strategy // Scientific report, 29 March, 2022. Режим доступу: <https://doi.org/10.1038/s41598-022-09148-2>. 12. Tymoshevskyy, B.G., Tkach, M.R. and Kharitonov, Y.M. (2005). Method and device for recycling polymer waste into alternative fuel. UA Patent 73900 C2. Available at: <https://worldwide.espacenet.com/publicationDetails/biblio?CC=UA&NR=73900C2>. 13. Tymoshevskiy B. H., Tkach M. R. Motorni palyva z polimernoi syrovyny: Vyrobnystvo ta zasto-suvannia./ Den pechati. – Kyiv: Kyiv Pres Den, 2011. – 352 s.

Надійшла до редакції 03.06.2025 р.

Тимошевський Борис Георгійович – доктор техн. наук, проф., професор кафедри "Двигуни внутрішнього згоряння, установки та технічна експлуатація", Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, Миколаїв, Україна, e-mail: borys.tymoshevskyy@gmail.com, <http://orcid.org/0000-0002-4649-702X>.

Ткач Михайло Романович – доктор техн. наук, проф., завідувач кафедри "Інженерна механіка та технологія машинобудування", Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, Миколаїв, Україна, e-mail: mykhaylo.tkach@gmail.com, <http://orcid.org/0000-0003-4944-7113>.

Попов Олександр Михайлович – аспірант кафедри "Двигуни внутрішнього згоряння, установки та технічна експлуатація", Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, Миколаїв, Україна, e-mail: popov_metc@ukr.net, <http://orcid.org/0009-0000-4690-8119>.

MOTOR PROPERTIES OF ALTERNATIVE FUELS, OBTAINED BY PROCESSING OF WASTE POLYMERS

B. G. Tymoshevsky, M. R. Tkach, O. M. Popov

The main objective of this paper is to evaluate the efficiency of a rational technology for converting thermoplastic polymer waste into motor fuels. The implementation of this technology would enable the utilization of previously untapped resources within the energy balance and provide an environmentally friendly method for disposing of such waste. Currently, the development of alternative motor fuels represents one viable approach to addressing the growing demand for energy in both transport and stationary power generation. Thermoplastic polymer waste is one of the potential feedstocks for this process. Compared to crude oil, this material offers several significant advantages, including a negligible content of sulfur, vanadium, heavy hydrocarbons, resins, naphthenic acids, and other undesirable components. This paper examines the key performance characteristics of alternative fuels derived from thermoplastic polymer waste. It has been established that, through the selection of an optimal technological process and purification scheme, it is possible to produce gasoline, diesel, heavy diesel, and boiler fuels. Moreover, by adjusting the processing parameters, the output can be optimized to favor the production of specific fuel types. The study demonstrates that the physicochemical properties of these fuels allow for their use in thermal engines without the need for major modifications to engine design or fuel systems. A schematic diagram of the technological process for producing alternative fuel from plastic waste is presented, along with data on the resulting fuel yields and motor properties. The findings indicate that, with appropriate technological parameters, the properties of these alternative fuels can closely resemble those of conventional fuels. Indicator diagrams for the 6Ch12/14 engine operating on both standard and alternative diesel fuels are provided. The analysis includes in-cylinder pressure levels, specific effective fuel consumption, carbon monoxide (CO) and nitrogen oxide (NO_x) emissions, and the rate of pressure rise (dP/dφ) during combustion. The results confirm that the use of the proposed alternative fuel does not necessitate significant modifications to engine design; appropriate adjustment of the fuel system is sufficient to ensure acceptable performance. In conclusion, the study supports the potential for the effective use of fuels derived from thermoplastic polymer waste from both an energy and environmental standpoint.

Keywords: technological process; fuel properties; alternative fuels; thermoplastic polymer waste; thermal engines; indicator diagram.