

УДК 621.434.432

DOI [https://doi.org/10.15589/znp2022.2\(489\).6](https://doi.org/10.15589/znp2022.2(489).6)**STUDY OF THE INFLUENCE OF THE USE OF ALTERNATIVE FUEL ON WORKING MARINE ENGINE PROCESS AND PERFORMANCE INDICATORS****ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ВИКОРИСТАННЯ АЛЬТЕРНАТИВНОГО ПАЛИВА НА РОБОЧИЙ ПРОЦЕС ТА ЕФЕКТИВНІ ПОКАЗНИКИ СУДНОВОГО ДВИГУНА****Ivan O. Shalapko***Ivanksua@gmail.com*

ORCID: 0000-0002-1062-0575

І. О. Шалапко,

аспірант

*Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolayiv**Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова м. Миколаїв, Україна*

Abstract. Currently, the world community has accumulated more than 7 billion tons of polymer waste, the condition of which allows them to be used in secondary polymer products. And this amount increases by approximately 190 million tons annually. On the other hand, polymer waste is a hydrocarbon raw material that can be used to produce alternative motor fuels.

When using efficient and environmentally safe technologies, the production of alternative motor fuels (gasoline, diesel, and fuel oil) from polymer waste can provide up to 5% of the global consumption of liquid motor fuels.

Mathematical modeling of the working process in a marine engine in the case of using fuel obtained by recycling plastic waste will allow to develop methods for calculating the working cycle of the engine, to determine the influence of fuel parameters on the nature of working processes in the cylinders, thermodynamic efficiency of the engine in general.

The task of researching the marine engine during the use of this type of fuel by the method of mathematical modeling is to establish a relationship between the technochemical properties of the fuel and the thermodynamic indicators of the engine's work process. The solution of the specified task is necessary for the development of physically correct and reliable methods of calculation, design, and optimization of modes of operation of ship internal combustion engines. These tasks can be successfully solved by experimental methods. However, the use of mathematical modeling will allow establishing the impact on the work process of those factors, which are very difficult to consider during experimental research. This makes it possible to obtain reliable results for the most general formulation of the task and to reduce the amount of expensive experimental research.

It should be noted that the working processes in internal combustion engines, which are operated on alternative fuel, have not been sufficiently studied. This circumstance affects the structure and main properties of the mathematical model, as well as the methods used for its implementation. Therefore, an important role in reliable modeling of the work process is played by the collection and generalization of information about work processes in internal combustion engines operating on non-standard fuel.

Key words: plastic waste, fuel, work processes, engine calculation, calculated indicators, marine engine.

Анотація. Нині світове співтовариство накопичило понад 7 млрд. т полімерних відходів, стан яких дозволяє використовувати їх у вторинних полімерних товарів. І ця кількість збільшується приблизно на 190 млн. т щорічно. З іншого боку, полімерні відходи є вуглеводневою сировиною, яка може бути використана для виробництва альтернативних моторних палив.

При використанні ефективних та екологічно безпечних технологій виробництво альтернативних моторних палив (бензинів, дизельних та мазутів) із полімерних відходів може забезпечити до 5% світового споживання рідких моторних палив.

Математичне моделювання робочого процесу у судновому двигуні у разі використання палива отриманого шляхом утилізації пластикових відходів дозволить розробити методики розрахунків робочого циклу двигуна, визначити вплив параметрів палива на характер перебігу робочих процесів у циліндрах, термодинамічну ефективність двигуна загалом.

Завдання дослідження суднового двигуна під час використання даного виду палива методом математичного моделювання у тому, щоб встановити зв'язок між технохімічними властивостями палива і термодинамічними-

ми показниками робочого процесу двигуна. Вирішення зазначеного завдання необхідне для розробки фізично коректних і надійних методів розрахунку, проектування та оптимізації режимів роботи судових ДВЗ. Ці завдання можуть бути успішно вирішені експериментальними методами. Проте застосування математичного моделювання дозволить встановити вплив на робочий процес тих чинників, врахувати які дуже складно під час експериментальних досліджень. Це дозволяє отримувати достовірні результати при найзагальнішій постановці завдання та скоротити обсяг дорогих експериментальних досліджень.

Необхідно відзначити, що робочі процеси в ДВЗ, які експлуатуються на альтернативному паливі, вивчені недостатньо. Ця обставина впливає на структуру та основні властивості математичної моделі, а також на методи, що використовуються для її реалізації. Тому важливу роль у достовірному моделюванні робочого процесу відіграють збір та узагальнення інформації про робочі процеси в ДВЗ, що працюють на нестандартному паливі.

Ключові слова: пластиківі відходи, паливо, робочі процеси, розрахунок двигуна, розрахункові показники, судовий двигун.

Постановка проблеми. В умовах експлуатації судових дизельних енергетичних установок часто складається ситуація, коли паливо, що надходить до двигуна, не відповідає встановленим стандартам. Ще складнішою є ситуація при використанні нестандартних або альтернативних палив, властивості яких не відповідають рекомендаціям заводів-виробників ДВЗ. У цих випадках необхідно прийняти адекватні рішення щодо регулювання паливної апаратури та системи керування двигуном з метою забезпечити його задовільну роботу на нестандартному паливі.

Прийняття таких рішень може бути здійснено на основі результатів математичного моделювання робочих процесів в ДВЗ, при якому враховуються властивості альтернативного палива і його вплив на показники робочого процесу.

Відомо, що швидкість зміни тиску в циліндрі на всіх стадіях робочого процесу двигуна залежить від зміни робочого об'єму циліндра, тепловіддачі від робочого тіла в циліндрі, виділення тепла при згорянні палива в камері згорання двигуна. Зміна фізико-хімічних властивостей палива, через процеси сумішотворення та згорання, впливає на робочі параметри двигуна і, зрештою, на його економію палива, надійність і довговічність. Відомі методи розрахунку згорання в циліндрі ДВЗ відображають зв'язок між фізико-хімічним складом палива та параметрами процесу згорання у вузьких межах з обмеженою точністю, що недостатньо при розрахунках робочого процесу ДВЗ при роботі на альтернативному паливі [1].

Викладене вище дає підстави вважати, що фізико-хімічні властивості палива викликають значний вплив на основні експлуатаційні параметри судових двигунів. Таким чином, загальне завдання полягає у розрахунку всіх параметрів роботи двигуна за допомогою математичної моделі, здатної адекватно відображати дійсні робочі процеси в судовому ДВЗ при його експлуатації на паливі, отриманому в результаті переробки пластикових відходів.

Основна частина. Для вирішення поставленого завдання завдяки математичній моделі розрахунку робочого процесу в судовому ДВЗ слід виконати

моделювання зміни параметрів роботи двигуна під впливом фізико-хімічної властивості палив. Щоб забезпечити вирішення поставлених завдань, така модель має бути:

- адекватною дійсним процесам, що протікають у судовому ДВЗ при роботі з даним видом палива;
- забезпечувати визначення паливної економічності та основних параметрів робочого процесу двигуна при використанні різних видів палива на розрахункових режимах роботи двигуна;
- забезпечувати необхідну точність визначення параметрів у заданому діапазоні зміни режимів роботи двигуна.

Як об'єкт математичного дослідження прийнятий судовий турбопоршневий двигун із запаленням від стиснення 6ЧН12/14. Дизельні двигуни цього типорозмірного ряду являють собою високооборотні чотиритактні нереверсивні тронкові двигуни, забезпечені нерозділеними камерами згорання, паливними насосами золотникового типу і призначені для використання у складі СЕУ як головні та допоміжні двигуни, а також як приводи електрогенераторів судових електростанцій. Основні показники двигуна наведено у табл. 1.

На рис. 2. наведено порівняння тиску та швидкості наростання тиску в циліндрі судового ДВЗ 6ЧН12/14 при роботі на дизельному паливі та паливі отриманого шляхом утилізації пластикових відходів [3].

При роботі на дизельному паливі та альтернативному паливі отриманому в результаті переробки відходів з пластику та поліетилену (АП) на режимі номінальної потужності та при часткових навантаженнях було встановлено, що період затримки займання при роботі на АП більше на 1 – 3,8°, що призводить до зміщення початку займання до ВМТ та підвищеної жорсткості процесу. Необхідно відзначити, що за розрахунковими даними при роботі на АП для двигуна 6ЧН12/14 характерно інтенсивне тепловиділення відразу після займання з наступним уповільненням процесу згорання та догорання. Більш інтенсивне тепловиділення на початку згорання під час роботи на АП



Рис. 1. Основні показники суднового ДВЗ 6ЧН12/14

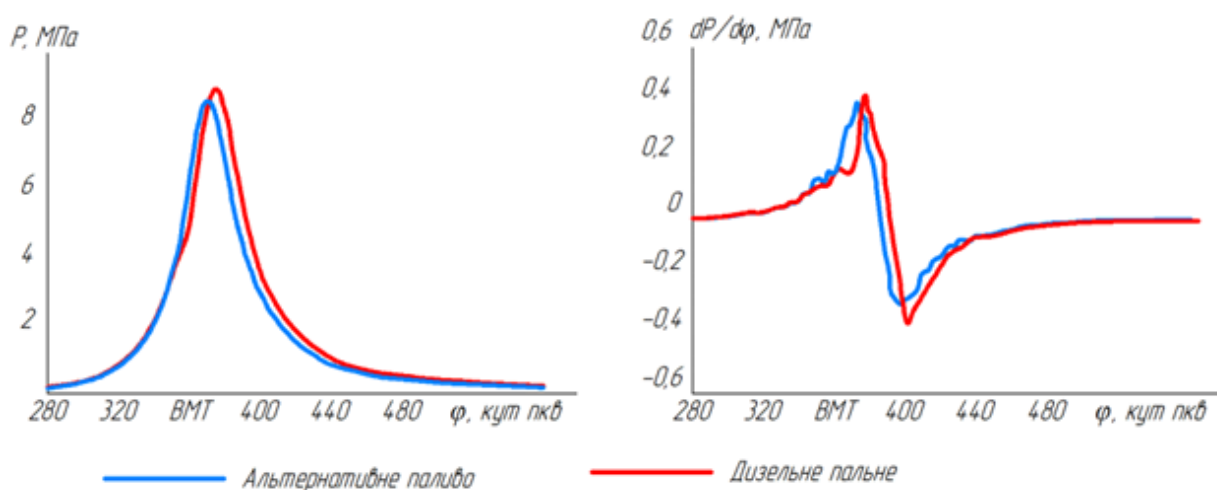


Рис. 2. Порівняння тиску та швидкості наростання тиску в циліндрі суднового ДВЗ 6ЧН12/14 при роботі на дизельному паливі та альтернативному паливі

Таблиця 1. Основні параметри двигуна 6ЧН12/14 [2]

Параметр	Значення
Тип дизеля	Судновий ДВЗ з наддувом
Хід/діаметр поршня, мм	120/140
Номінальна частота обертання колінчастого валу, хв ⁻¹	1500
Середня швидкість поршня, м/с	7
Потужність номінальна, кВт	84,5
Ступінь стиснення	13,5
Параметри форсунки (кількість × діаметр отворів, мм)	5×0,4
Тиск початку впорскування, МПа	17,6...18,3
Геометричний кут випередження подачі палива до ВМТ, град.п.к.	18...22
Турбокомпресор	ТКР 11

обумовлює підвищене значення dP/df порівняно з роботою на дизельному паливі [4].

З рисунку 2 видно, що на режимах великого навантаження значення максимального тиску P_{max} , максимальної швидкості наростання тиску dP/df при використанні АП у всіх проведених розрахунках вище, ніж для дизельного палива. При роботі двигуна на АП, потужності двигуна 70 кВт та частоті обертання 1500 об/хв зростає швидкість наростання тиску, що перевищує аналогічний показник для дизельного палива на 0,5 МПа; абсолютне значення підвищення максимального тиску на АП становить 0,45 МПа, а середнього – на 0,3 МПа порівняно з роботою дизельного палива.

Однак із зменшенням навантаження період затримки займання АП ще більше перевищує аналогічний показник для стандартного палива (різниця становить 3,8 град. п.к.в. при навантаженні 20%). Внаслідок чого більш висока швидкість згоряння палива в початковий період не призводить до зростання P_{max} і пізнішого початку займання і розвитку процесу згоряння при збільшенні обсягу циліндра.

Так, при роботі на середніх навантаженнях період затримки займання АП більший ніж у дизельного палива приблизно на 1,8 град. п.к.в. і приблизно однаковому P_{max} , абсолютне значення підвищення максимального тиску на АП становить 0,05 МПа. На режимах від 20% до 40% навантаження значення максимального тиску в циклі при роботі на АП стає менше, ніж цей показник при роботі на дизельному паливі [3].

Дані зміни обумовлені тим, що паливо з високим цетановим числом, за інших рівних умов, має кращу

здатність до самозаймання у порівнянні з паливом з низькими цетановими числами (помітно нижче, ніж у дизельного) більш швидко випаровуються та активуються, отже, велика частка цих палив буде перебувати у збудженому стані, але згоратиме переважно у гетерогенному середовищі, не отримавши належної активації. Це негативно позначається на якості згоряння. Двигун працюватиме 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, і повнота згоряння знижуються, зростають втрати тепла з відпрацьованими газами, зменшуються індикаторний, механічний і ефективний ККД – знижуються потужність і економічність дизеля, зростає питома ефективна витрата палива [5].

При навантаженні ДВЗ близької до номінальної, зниження величини питомої ефективної витрати палива g_e становить 4...6 г/(кВт·год). На малих навантаженнях виявлено підвищення величини g_e на 10...12 г/(кВт·год) (рис. 3). Це свідчить про незначну зміну характеру робочого процесу ДВЗ на альтернативному паливі порівняно з дизельним.

Разом з тим, зазначене зниження g_e визначається, насамперед дещо більшою величиною теплотворної здатності альтернативного палива. Таким чином, проведені експериментальні дослідження показують, що параметри робочого процесу і динаміка тепловиді-

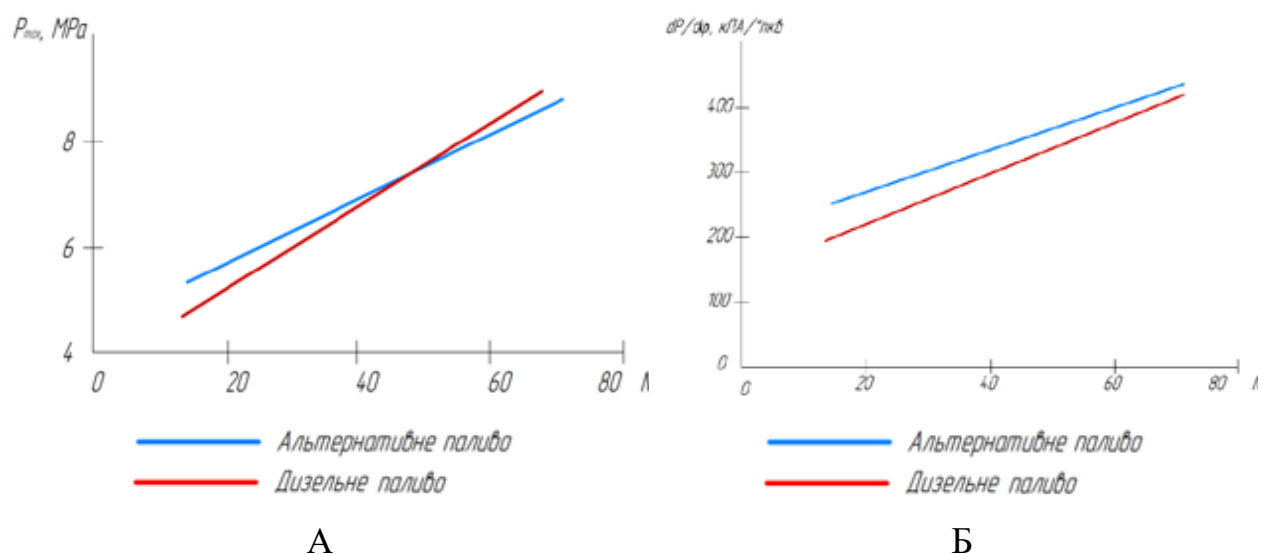


Рис. 3. А – Максимальний тиск у циліндрі суднового ДВЗ 6ЧН12/14 при роботі на дизельному та альтернативному паливі. Б – Величина наростання тиску в циліндрі суднового ДВЗ при роботі на дизельному та альтернативному паливі

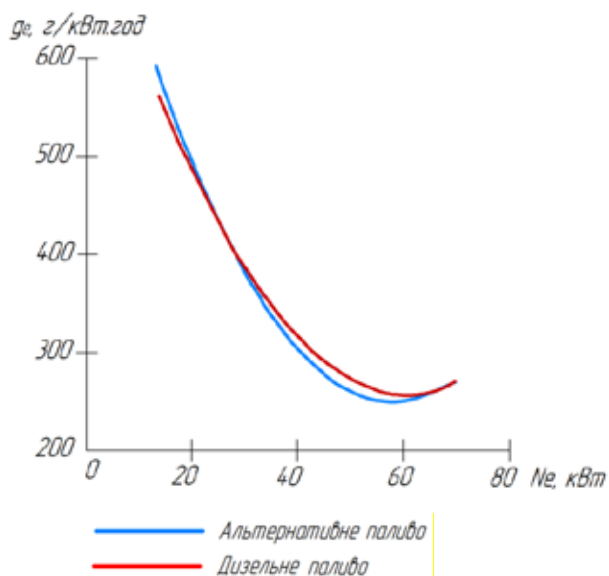


Рис. 4. Питома ефективна витрата палива суднового ДВЗ 6ЧН12/14

лення залежать від цетанового числа палива і від кількості ароматичних вуглеводнів, що містять в ньому.

Для зменшення негативного впливу зазначених факторів на робочі показники суднового ДВЗ необхідно регулювати кут випередження подачі палива в межах 15-75 град. п.к.в. залежно від технохімічних властивостей використовуваних палив. Це дозволить забезпечити тривалу роботу дизеля на паливі з низьким цетановим числом при задовільній витраті палива [6].

Кут затримки займання при використанні альтернативного та дизельного палив відрізняється на 3...5° ПКВ. залежно від навантаження ДВЗ.

Слід зазначити, що наведені закономірності суттєво відрізняються від аналогічних, отриманих стосовно роботи ДВЗ на сумішах дизельного палива та бензину [7]. Така відмінність пов'язана з більш сприятливим структурно груповим складом альтернативного палива, що розглядається. Насамперед це відноситься до зниженого вмісту ароматичних вуглеводнів.

Як відомо, підвищений їх вміст призводить до погіршення самозаймання палив, підвищення кута

затримки займання підвищеного нагароутворення [9]. Величина коефіцієнта надлишку повітря при роботі ДВЗ на паливах, що розглядаються практично однакова. Так, якщо при роботі поблизу номінального навантаження ДВЗ значення α становить 2,1...2,2 то на режимі холостого ходу коефіцієнт надлишку повітря збільшується до 5,8...6,1.

Розмір температури відхідних газів становить 370...600 К залежно від навантаження ДВЗ та палива. На режимах, близьких до номінальної потужності, різниця температур газів, що відходять ДВЗ при роботі на аналізованих паливах дуже незначна і становить 5...15 К.

Висновок. Різний елементарний склад палив визначає відмінності у протіканні робочого процесу, створюючи передумови до детальнішого вивчення процесів, які у двигуні. Раніше вивчені відомості дозволяють підготувати вихідні дані для моделювання робочого процесу ДВЗ та паливоподачі з урахуванням виду альтернативного палива.

При певному регулюванні паливної апаратури можна досягти більш високих ефективних показників. Варто враховувати і те, що альтернативні палива є джерелом енергії, що відновлюється.

Процес практичного та масового впровадження альтернативних видів палива неминучий, оскільки визначається об'єктивними причинами обмеженості запасів нафти у світі та зростаючими вимогами щодо екології. Використання альтернативних видів палива відбуватиметься не революційно, а еволюційно з максимальним використанням існуючої інфраструктури паливного ринку.

Приведений аналіз експериментальних та розрахункових даних показав принципову можливість роботи дизельного двигуна на альтернативному паливі, отриманому шляхом переробки відходів термопластичних полімерів. При цьому не потрібно внесення зміни в конструкцію двигуна, його агрегатів та систем. Для забезпечення ефективної роботи двигуна достатнім є налаштування паливної апаратури.

Дослідження показали також, що параметри робочого процесу і динаміка тепловиділення залежать від цетанового числа палива і від кількості ароматичних вуглеводнів, що містяться в ньому [9].

REFERENCES

- [1] Dong, J., Tang, Y., Nzihou, A., Chi, Y., Weiss-Hortala, E., Ni, M., & Zhou, Z. (2018). Comparison of waste-to-energy technologies of gasification and incineration using life cycle assessment: Case studies in Finland, France and China. *Journal of Cleaner Production*, 203, 287–300. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.08.139>
- [2] Motorship.com.ua. Kharakterystyky dyzel'noho dvyhuna 6ч12/14. Sudnove tekhnichne postachannya. Retrieved July 25, 2022, from <https://motorship.com.ua/>
- [3] Timoshevskiy, B. G., Tkach, M. R. (2011). *Motornyye topliva iz polimernogo syr'ya: proizvodstvo i primeneniye* [Motor fuels from polymer raw materials: production and application]. K.: Izdatelstvovo «Den' Pechati». [in Russian]
- [4] Tkach, M. R. (2007). *Nauchno-tekhnicheskkiye osnovy sozdaniya sudovykh energeticheskikh ustanovok na baze al'ternativnykh toplivno-energeticheskikh resursov* (Doctoral dissertation). Natsional'nyy universitet korablestroyeniya imeni admirala Makarova. Nikolayev. [in Russian], 339, 137-140

- [5] Liu, Z., Guo, Z., Rao, X., Xu, Y., Sheng, C., & Yuan, C. (2022). A comprehensive review on the material performance affected by gaseous alternative fuels in internal combustion engines. *Engineering Failure Analysis*, 139, 78–82. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2022.106507>
- [6] Timochevskiy B.G, Tkach M.R, (2009). *Motorni vlastyivosti al'ternatyvnykh palyv, otrymanykh z vidkhodiv polimeriv* [Motor properties of alternative fuels derived from polymer waste]. *Dvyhuny Vnutrishn'oho zhoryannya no.1*, pp. 83–89.
- [7] Gülüm, M. (2022). Effects of compression ratio, blending ratio and engine speed on fuel cost, performance and exhaust emissions of a diesel engine fueled with bio-derived alternative fuels. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 53, 41–44. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2022.102464>
- [8] Zhao, B., Wang, H., Yao, Z., Alfarraj, S., Ali Alharbi, S., Krishnan, R., Thuy Lan Chi, N., & Brindhadevi, K. (2022). Processing and utilization of the solid plastic waste oil as the sustainable substitute for fossil fuel for the CI engine from microwave assisted pyrolysis process. *Fuel*, 327, 227–238. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.125191>
- [9] Das, A. K., Hansdah, D., Mohapatra, A. K., Panda, A. K. (2020). Energy, Exergy and emission analysis on a DI single cylinder diesel engine using pyrolytic waste plastic oil diesel blend. *Journal of the Energy Institute*, 93, 24–26. <https://doi.org/10.1016/j.joei.2020.01.024>
- [10] Parthasarathy, M., Ramkumar, S., Elumalai, P. V., Kumar Gupta, S., Krishnamoorthy, R., Mohammed Iqbal, S., Kumar Dash, S., & Silambarasan, R. (2021). Experimental investigation of strategies to enhance the homogeneous charge compression ignition engine characteristics powered by waste plastic oil. *Energy Conversion and Management*, 236, 112–117. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2021.114026>
- [11] Jahirul, M. I., Rasul, M. G., Schaller, D., Khan, M. M. K., Hasan, M. M., & Hazrat, M. A. (2022). Transport fuel from waste plastics pyrolysis – a review on technologies, challenges and opportunities. *Energy Conversion and Management*, 258, 224–228. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2022.115451>

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] Dong, J., Tang, Y., Nzihou, A., Chi, Y., Weiss-Hortala, E., Ni, M., & Zhou, Z. (2018). Comparison of waste-to-energy technologies of gasification and incineration using life cycle assessment: Case studies in Finland, France and China. *Journal of Cleaner Production*, 203, 287–300. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.08.139>
- [2] Романюк, Є. (2020). Характеристики дизельного двигуна бч12/14. Суднове технічне постачання. Дата доступу 25 Липня 2022, електронний ресурс Motorship.com.ua
- [3] Тимошевский Б.Г., Ткач М.Р. (2011). *Моторные топлива из полимерного сырья, производство и применение*. К.: Изд-во «День Печати», – 290 с., 122–134.
- [4] Ткач, М. Р. (2007). *Научно-технические основы создания судовых энергетических установок на базе альтернативных топливно-энергетических ресурсов*. (Диссертация на соискание научной степени доктора технических наук). Николаев. 2007., 137–140
- [5] Liu, Z., Guo, Z., Rao, X., Xu, Y., Sheng, C., & Yuan, C. (2022). A comprehensive review on the material performance affected by gaseous alternative fuels in internal combustion engines. *Engineering Failure Analysis*, 139, 78–82. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2022.106507>
- [6] Тимошевский Б.Г., Ткач М.Р., (2009). *Моторні властивості альтернативних палив отриманих з відходів полімерів*. *Двигуни внутрішнього згорання № 1*, с. 83–89.
- [7] Gülüm, M. (2022). Effects of compression ratio, blending ratio and engine speed on fuel cost, performance and exhaust emissions of a diesel engine fueled with bio-derived alternative fuels. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 53, 41–44. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2022.102464>
- [8] Zhao, B., Wang, H., Yao, Z., Alfarraj, S., Ali Alharbi, S., Krishnan, R., Thuy Lan Chi, N., & Brindhadevi, K. (2022). Processing and utilization of the solid plastic waste oil as the sustainable substitute for fossil fuel for the CI engine from microwave assisted pyrolysis process. *Fuel*, 327, 227–238. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.125191>
- [9] Das, A. K., Hansdah, D., Mohapatra, A. K., Panda, A. K. (2020). Energy, Exergy and emission analysis on a DI single cylinder diesel engine using pyrolytic waste plastic oil diesel blend. *Journal of the Energy Institute*, 93, 24–26. <https://doi.org/10.1016/j.joei.2020.01.024>
- [10] Parthasarathy, M., Ramkumar, S., Elumalai, P. V., Kumar Gupta, S., Krishnamoorthy, R., Mohammed Iqbal, S., Kumar Dash, S., & Silambarasan, R. (2021). Experimental investigation of strategies to enhance the homogeneous charge compression ignition engine characteristics powered by waste plastic oil. *Energy Conversion and Management*, 236, 112–117. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2021.114026>
- [11] Jahirul, M. I., Rasul, M. G., Schaller, D., Khan, M. M. K., Hasan, M. M., & Hazrat, M. A. (2022). Transport fuel from waste plastics pyrolysis – a review on technologies, challenges and opportunities. *Energy Conversion and Management*, 258, 224–228. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2022.115451>

© І. О. Шалапко

Дата надходження статті до редакції: 19.07.2022

Дата затвердження статті до друку: 28.07.2022