

10.31653/smf50.2025.131-140

Фомін О.В.,¹ Мельник О.В.,¹ Черкашин О.П.,² Гунько Є.В.¹¹ Національний транспортний університет,² Східноукраїнський національний університет ім. В. Даля

ПЕРСПЕКТИВНІ ШЛЯХИ ПІДВИЩЕННЯ НАДІЙНОСТІ ТА ЕФЕКТИВНОСТІ МЕХАНІЗМІВ ГАЗОРОЗПОДІЛУ ЕНЕРГЕТИЧНИХ УСТАНОВОК

Постановка проблеми в загальному вигляді. Сучасна морська індустрія висуває дедалі жорсткіші вимоги до надійності, економічності та екологічності суднових енергетичних установок [1-4]. У цьому контексті, дослідження, присвячене підвищенню надійності та ефективності механізмів газорозподілу (МГР), набуває особливої актуальності. Ці механізми забезпечують своєчасне та точне надходження повітря і видалення відпрацьованих газів, безпомилкова робота яких безпосередньо впливає на всі ключові показники: потужність, економічність, токсичність випускних газів та, що найважливіше, на надійність всієї системи. Проте, саме МГР є одними з найбільш навантажених і вразливих вузлів, що часто стають причиною аварійних зупинок і дорогого ремонту. Зростання експлуатаційних швидкостей та навантажень, використання низькосортного палива, а також прагнення до мінімізації розмірів двигунів без втрати потужності призводять до збільшення ризику відмов [5-7].

Актуальність посилюється також тим, що надійність МГР прямо корелює з економічністю. Несправності, знос кулачкових валів, пошкодження клапанів або їх сидниць, призводять до порушення герметичності, втрати тиску та, як наслідок, до збільшення питомої витрати палива і зниження потужності. Це не лише підвищує експлуатаційні витрати, а й суперечить сучасним екологічним стандартам. Дослідження також важливе з огляду на необхідність скорочення викидів шкідливих речовин, зокрема оксидів азоту NO_x та сірки SO_x , що є одним з головних завдань з забезпечення екологічності морського транспорту [8-10]. Оптимізація МГР дозволяє більш точно керувати процесами згоряння, що сприяє зменшенню токсичності випускних газів. Таким чином, нагальна потреба в розробці та впровадженні нових, більш надійних та ефективних конструктивних рішень, матеріалів і технологій для МГР є беззаперечною. Це дозволить забезпечити стабільну, безпечну та економічно вигідну експлуа-

тацію суднових двигунів, що, своєю чергою, сприятиме сталому розвитку морського транспорту в цілому.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Дослідження [11] зосереджене на аналізі поля течії та взаємодії вихорів у газовому потоці двох випускних клапанів двигуна внутрішнього згоряння (ДВЗ). Автори застосували експериментальні та чисельні методи для вивчення складних газодинамічних явищ. Результати демонструють сильну взаємодію вихрових структур, що впливають на коефіцієнт корисної дії (ККД) будь-якого теплового двигуна, обладнаного МГР. Робота показує перспективність МГР у підвищенні енергоефективності суден. Водночас визначені області можливих втрат, що вимагають оптимізації конструкцій.

У статті [12] представлено результати вимірювань кавітаційних процесів у проточній частині МГР. Авторами використано експериментальні методики та сучасні засоби візуалізації. Дослідження показує залежність розвитку каверн від режимів роботи МГР. Робота підтверджує важливість оптимізації геометрії тарілок клапанів для зниження шуму та вібрацій. Отримані дані можуть бути основою для удосконалення високооберткових суднових ДВЗ.

В роботі [13] розглянуто вплив різних навантажувальних умов на поле течії, створене двома газовими потоками. Результати показують значні зміни у структурі газового потоку залежно від режиму роботи МГР. Доведено, що правильне узгодження швидкісних параметрів є критично важливим для ефективності ДВЗ. Виявлені закономірності дозволяють підвищити прийомистість ДВЗ суднових енергетичних установок.

У [14] здійснено порівняльний аналіз топологій МГР двигунів малої потужності. Дослідження враховує електромагнітні, теплові та енергетичні аспекти конструкцій. Показано, що вибір оптимальної топології МГР суттєво впливає на ефективність роботи цих двигунів. Представлені результати демонструють потенціал покращення МГР для двигунів суден морського транспорту. Це відкриває перспективи для розробки більш енергоефективних ощадних суднових установок.

Дослідження [15] присвячено визначенню оптимального узгодження фаз відкриття та закриття МГР з метою мінімізації енергоспоживання. Методика передбачає багатопараметричний аналіз режимів роботи ДВЗ. Результати показують, що правильне налаштування МГР дозволяє значно знизити витрату палива. Дослідження має практичне значення для проектування сучасних енергетичних

установок суден. Автори підкреслюють важливість інтеграції газодинамічних і енергетичних параметрів.

У [16] представлено систему гібридної передачі даних для безпілотних надводних апаратів в умовах завад. Дослідження зосереджене на надійності та безперервності роботи в складних умовах. Розробка має прямий зв'язок з удосконаленням управління енергетичними установками. Використання такої системи дозволяє підвищити ефективність і безпеку функціонування суднових комплексів.

В роботі [17] виконано чисельне моделювання кавітаційного шуму МГР із застосуванням акустичного рівняння Фоукса-Вільямса-Гокінгса. Досліджено вплив кавітаційних явищ на шумові характеристики МГР. Результати свідчать, що оптимізація параметрів МГР дозволяє знизити інтенсивність випромінювання ДВЗ.

У [18] розглянута взаємодія газових потоків, що утворюються під час застосування реєстрового наддуву. Дослідження базується на експериментальних та чисельних методах оптимізації фаз роботи МГР. Автори показали складність газодинаміки подібних систем та їх вплив на ефективність. Результати важливі для вдосконалення конструкцій, здатних мінімізувати енергетичні втрати.

Дослідження [19] присвячено визначенню впливу технічного стану поверхонь МГР на паливну ефективність судна. Результати свідчать, що навіть незначні відхилення у стані поверхонь суттєво змінюють витрату палива. Автори підкреслюють необхідність регулярного технічного обслуговування МГР. Робота демонструє, що оптимізація МГР має супроводжуватися контролем стану їх «повітряних» та «газових». Це важливий аспект для інтегрованої стратегії енергоефективності суден.

У публікації [20] розглянуто параметри ємнісних накопичувачів енергії для підземного рухомого складу. Хоча робота спрямована на залізничну сферу, підходи можуть бути застосовані й для суднових установок. Автори досліджують оптимальність енергозберігаючих систем. Розробка сприяє підвищенню автономності транспортних засобів. Це створює наукові передумови для інтеграції альтернативних джерел у судноплавстві.

У роботі [21] вивчені можливості зниження витрати палива завдяки оптимальному використанню МГР. Робота показує, що вибір параметрів МГР суттєво впливає на енергоефективність. Автори довели ефективність комбінованого підходу під час проектування.

Практична користь полягає у потенційному зниженні експлуатаційних витрат.

Дослідження [22] присвячено перспективам відновлюваної енергетики у суднопластві. Автори аналізують технологічні та екологічні аспекти інтеграції нових джерел енергії. Дослідження демонструє важливість переходу на стійкіші системи. Результати можуть бути враховані у створенні гібридних суднових установок. Це підвищує екологічну ефективність морського транспорту.

Робота [23] підтверджує важливість оптимізації МГР для зменшення паливних витрат. Автори наводять експериментальні та розрахункові результати. Показано, що удосконалення геометрії МГР дає значний ефект. Практична реалізація сприятиме економії ресурсів. Це підкреслює актуальність тематики для сучасного суднобудування.

Дослідження [24] присвячено вивченню параметрів МГР енергії для транспортних засобів. Автори обґрунтовують як теоретичні, так і практичні аспекти використання систем управління газовими та повітряним потоками. Висновки дослідження є універсальними. Вони можуть бути адаптовані для суднових енергетичних установок. Це розширює спектр методів підвищення енергоефективності у морському транспорті.

У роботі [25] запропоновано методику вибору двигуна і МГР з урахуванням мінімізації витрати палива. Автори застосували комплексний підхід для визначення оптимальних параметрів налаштування МГР. Дослідження демонструє зв'язок між характеристиками двигуна і МГР. Результати підтверджують доцільність використання регульованого випуску газів. Це відкриває перспективи для оптимізації суднових енергетичних установок.

У дослідженні [26] розроблена методика відкритих випробувань гібридного ДВЗ. Автори представили експериментальну базу для визначення характеристик його МГР. Дослідження підтверджує переваги багатофазного випуску для подібних двигунів.

Аналіз наукової та технічної літератури свідчить, що питанню підвищення надійності й ефективності механізмів газорозподілу суднових двигунів, попри його беззаперечну важливість, не приділено належної уваги. Існуючі дослідження здебільшого зосереджені на загальних питаннях роботи двигунів внутрішнього згоряння або на окремих аспектах, як-от використання нових матеріалів чи вдосконалення систем змащення. Комплексного підходу, який би об'єднував

аналіз конструктивних недоліків, розрахунків навантажень та вібрацій, а також розробку інноваційних рішень, що враховують особливості експлуатації в морських умовах, майже не існує. Відсутність систематизованих даних про типові відмови та їх причини у сучасних МГР також створює дослідницьку прогалину, яку необхідно заповнити. Це підкреслює необхідність проведення глибокого науково-прикладного дослідження.

Постановка завдання. Сучасні суднові двигуни працюють в екстремальних умовах, що висуває надзвичайно високі вимоги до всіх їх компонентів. Механізми газорозподілу є одним із найбільш навантажених вузлів, робота якого безпосередньо визначає економічні та екологічні показники двигуна. Проблема полягає в тому, що попри постійне вдосконалення технологій, надійність цих механізмів залишається відносно низькою. Використання важкого палива, високі термічні й механічні навантаження, а також вібрації призводять до передчасного зносу кулачкових валів, корозії клапанів та їх сідел, а також до руйнування пружин та інших елементів.

Наслідками цих відмов є не лише зниження потужності та збільшення витрати палива, а й ризик серйозних аварій, що можуть призвести до повного виходу двигуна з ладу. Економічні втрати від простоїв судна, ремонту та заміни дорогого обладнання є значними. Крім того, неоптимальна робота МГР призводить до неповного згоряння палива, що збільшує викиди шкідливих речовин, суперечачи міжнародним екологічним нормам. Таким чином, існує нагальна потреба у розробці ефективних, надійних та економічно обґрунтованих рішень для підвищення працездатності МГР.

Завданням дослідження є наукове обґрунтування та розробка перспективних шляхів підвищення надійності та ефективності механізмів газорозподілу судових двигунів. Це включає аналіз існуючих проблем, розробку нових конструктивних рішень та впровадження інноваційних технологій, що дозволять досягти оптимальних показників роботи.

Виклад основного матеріалу дослідження. Конструктивні рішення щодо удосконалення судових двигунів повинні бути спрямовані на забезпечення довговічності та безперебійної роботи двигуна. Ця може бути досягнута:

використанням міцних матеріалів – застосування високотемпературних матеріалів, які можуть витримувати екстремальні навантаження, значно зменшує ризик зносу та пошкодження компонентів;

додатковим розміщенням інформаційних датчиків – дублювання важливих датчиків забезпечує надійність системи керування. Якщо один датчик виходить з ладу, інший продовжує надавати необхідні дані, запобігаючи аварійному відключенню;

встановленням перепускних клапанів – цей елемент керує потоком газів, захищаючи турбокомпресор та інші компоненти від надмірного тиску, що є критично важливим для їхньої довготривалої роботи.

Підвищення ефективності ГРМ досягається впровадженням інновацій, спрямованих на зменшення споживання палива та підвищення потужності двигуна. До них відносяться:

система рекуперації тепла – обладнання, яке перетворює тепло відпрацьованих газів на додаткову енергію. Це дозволяє використовувати енергію, яка інакше була б втрачена, значно підвищуючи загальний ККД двигуна;

оптимізована форма впускних і випускних каналів – сприяє кращому змішуванню палива з повітрям та ефективнішому згорянню;

турбокомпресор зі змінною геометрією – технологія дозволяє змінювати потік газів через турбіну, що забезпечує оптимальну продуктивність наддуву за різних обертів двигуна та навантажень.

Ці рішення працюють разом, створюючи цілісну систему, яка не лише підвищує продуктивність двигуна, а й робить його більш стійким до відмов, що є ключовим для забезпечення надійності робот суден морського транспорту.

Висновки і перспективи подальших досліджень. За результатами проведеного науково-прикладного дослідження можна зробити такі висновки:

Проблеми надійності та ефективності механізмів газорозподілу судових двигунів є актуальними, існуючі технічні рішення не повною мірою відповідають сучасним вимогам.

Основними причинами відмов є динамічні навантаження, абразивний знос та корозія, спричинені агресивним середовищем та використанням низькосортного палива.

Застосування нових матеріалів, таких як керамічні та композитні покриття, що суттєво підвищують зносостійкість деталей.

Інноваційні конструктивні рішення, зокрема оптимізовані профілі кулачків та системи приводу, дозволяють знизити вібрації і підвищити точність роботи механізму.

Впровадження результатів дослідження дозволить скоротити експлуатаційні витрати, зменшити ризик аварій та підвищити паливну ефективність суднових двигунів.

Отримані дані можуть бути використані для модернізації існуючих двигунів та проєктування нових, більш надійних та екологічних.

Перелік використаних джерел

1. Petrychenko O., Levinskyi M. Trends and preconditions for widespread adoption of liquefied natural gas in maritime transport // *Transport Systems and Technologies*. 2024. Vol. 43. P. 21-36. DOI:10.32703/2617-9059-2024-43-2

2. Sagin S., Sagin A. Development of method for managing risk factors for emergency situations when using low-sulfur content fuel in marine diesel engines // *Technology Audit and Production Reserves*. 2023. № 5 (1(73)). P. 37-43. <https://doi.org/10.15587/2706-5448.2023.290198>.

3. Sagin S.V., Kuropyatnyk O.A. Using exhaust gas bypass for achieving the environmental performance of marine diesel engines // *Austrian Journal of Technical and Natural Sciences*. 2021. № 7-8. P. 36-43. <https://doi.org/10.29013/AJT-21-7.8-36-43>.

4. Kuropyatnyk O.A. Reduction of NO_x emission in the exhaust gases of low-speed marine diesel engines // *Austrian Journal of Technical and Natural Sciences*. 2018. № 7-8. P. 37-42. doi.org/10.29013/AJT-18-7.8-37-42.

5. Sagin A.S., Zablotskyi Yu.V. Reliability maintenance of fuel equipment on marine and inland navigation vessels // *Austrian Journal of Technical and Natural Sciences. Scientific journal*. 2021. № 7-8. P. 14-17. <https://doi.org/10.29013/AJT-21-7.8-14-17>.

6. Kuropyatnyk O.A. Selection of optimal operating modes of exhaust gas recirculation system for marine low-speed diesel engines // *Materials of the International Conference “Process Management and Scientific Developments”* (Birmingham, United Kingdom, January 16, 2020. Part 4). P. 203-211. DOI. 10.34660/INF.2020.4.52992

7. Sagin S.V., Sagin S.S., Madey V. Analysis of methods of managing the environmental safety of the navigation passage of ships of maritime transport // *Technology Audit and Production Reserves*. 2023. № 4 (3(72)). P. 33–42. <https://doi.org/10.15587/2706-5448.2023.286039>.

8. Petrychenko O., Levinskyi M., Goolak S., Lukoševičius V. Prospects of Solar Energy in the Context of Greening Maritime Transport //

Sustainability. 2025. Vol. 17. P. 2141. <https://doi.org/10.3390/su17052141>.

9. Sagin S., Kuropyatnyk O., Rusnak D. Improvement of the process of cleaning exhaust gases of marine diesels from sulfur oxides // *Technology Audit and Production Reserves*. 2025. №4(1(84)). P. 72–79. <https://doi.org/10.15587/2706-5448.2025.337616>.

10. Sagin S., Chymshyr V., Karianskyi S., Kuropyatnyk O., Madey V., Rusnak D. Using Ultrasonic Fuel Treatment Technology to Reduce Sulfur Oxide Emissions from Marine Diesel Exhaust Gases // *Energies*. 2025. Vol. 18. P. 4756. <https://doi.org/10.3390/en18174756>.

11. Alves Pereira F., Capone A., Di Felice F.. Flow field and vortex interactions in the near wake of two counter-rotating propellers // *Applied Ocean Research*. 2021. Vol. 117. P. 102918. <https://doi.org/10.1016/j.apor.2021.102918>.

12. Capone A., Alves Pereira F., Di Felice F. Flow and cavity measurements in a super-cavitating propeller // *Journal of Marine Science and Engineering*. 2024. Vol. 12(2). P. 243. <https://doi.org/10.3390/jmse12020243>.

13. Capone A., Di Felice F., Alves Pereira F. On the flow field induced by two counter-rotating propellers at varying load conditions // *Ocean Engineering*. 2021. Vol. 221. P. 108322. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2020.108322>.

14. Cheng B., Pang S., Ou H., Hu Z., Mao Z. Comparative research on topologies of contra-rotating motors for underwater vehicles // *Journal of Marine Science and Engineering*. 2023. Vol. 11(11). P. 2042. <https://doi.org/10.3390/jmse11112042>.

15. Hou L., Yin L., Hu A., Chang X., Lin, Y., Wang, S. Optimal matching investigation of marine contra-rotating propellers for energy consumption minimization // *Journal of Marine Science and Technology*. 2021. Vol. 26. P. 1184–1197. <https://doi.org/10.1007/s00773-021-00809-x>.

16. Kurdiuk S., Dremliuk V., Melnyk O., Onishchenko O., Fomin O., Pištěk V., Kučera P. Development of a High-Reliability Hybrid Data Transmission System for Unmanned Surface Vehicles Under Interference Conditions // *Drones*. 2025. Vol. 9(3). P. 174. <https://doi.org/10.3390/drones9030174>.

17. Hu J., Ning X., Zhao W., Li F., Ma J., Zhang W., Sun S., Zou M., Lin C. Numerical simulation of the cavitating noise of contra-rotating propellers based on detached eddy simulation and the Ffowcs Williams–

Hawkings acoustics equation // *Physics of Fluids*. 2021. Vol. 33(11). P. 115117. <https://doi.org/10.1063/5.0065456>.

18. Posa A., Capone A., Alves Pereira F., Di Felice F., Broglia R. Interaction between the helical vortices shed by contra-rotating propellers // *Physics of Fluids*. 2024. Vol. 36(5). P. 055116. <https://doi.org/10.1063/5.0207145>.

19. Tadros M., Ventura M., Guedes Soares C. Effect of Hull and Propeller Roughness during the Assessment of Ship Fuel Consumption // *Journal of Marine Science and Engineering*. 2022. Vol. 11(4). P. 784. <https://doi.org/10.3390/jmse11040784>.

20. Fomin O., Sulym A., Kulbovsky I., Khozia P., Ishchenko V. Determining rational parameters of the capacitive energy storage system for the underground railway rolling stock // *Eastern-European journal of enterprise technologies*. 2018. Vol. 2/1(92). P. 63-71. DOI: 10.15587/1729-4061.2018.126080.

21. Tadros M., Ventura M., Guedes Soares C. Towards Fuel Consumption Reduction Based on the Optimum Contra-Rotating Propeller // *Journal of Marine Science and Engineering*. 2022. Vol. 10(11). P. 1657. <https://doi.org/10.3390/jmse10111657>.

22. Melnyk O., Bulgakov M., Fomin O., Onyshchenko S., Onishchenko O., Pulyaev I. Sustainable development of renewable energy in shipping: Technological and environmental prospects // *Scientific Journal of Silesian University of Technology. Series Transport*. 2025. Vol. 127. P. 165–188. <https://doi.org/10.20858/sjsutst.2025.127.10>.

23. Tadros M., Ventura M., Guedes Soares C. Towards fuel consumption reduction based on the optimum contra-rotating propeller // *Journal of Marine Science and Engineering*. 2022. Vol. 10(11). P. 1657. <https://doi.org/10.3390/jmse10111657>.

24. Sulim A.O., Fomin O.V., Khozia P.O., Mastepan A. Theoretical and practical determination of parameters of on-board capacitive energy storage of the underground rolling stock // *Scientific Bulletin of National Mining University*. 2018. Iss. 5(1). P. 79-87. DOI: 10.29202/nvngu/2018-5/8.

25. Tadros M., Vettor R., Ventura M., Guedes Soares C. Coupled Engine-Propeller Selection Procedure to Minimize Fuel Consumption at a Specified Speed // *Journal of Marine Science and Engineering*. 2021. Vol. 9(1). P.59. <https://doi.org/10.3390/jmse9010059>.

26. Wakabayashi T., Katsui T. Propeller Open-Water Test Method for Hybrid Contra Rotating Propeller // Journal of Marine Science and Engineering. 2025. Vol. 13(5). P. 858. <https://doi.org/10.3390/jmse13050858>.