

© Тимошук О.М., Левченко О.В.

АНАЛІЗ ТА ОБҐРУНТУВАННЯ МЕТОДІВ ЗНИЖЕННЯ ВИКИДІВ ОКСИДІВ АЗОТУ В АТМОСФЕРУ СУДНОВИМИ ЕНЕРГЕТИЧНИМИ УСТАНОВКАМИ

У статті розглянуто проблему утворення та викидів оксидів азоту (NO_x), що виникають у процесі роботи суднових енергетичних установок. Показано, що NO_x є одним з найбільш небезпечних компонентів відпрацьованих газів, оскільки вони беруть участь у формуванні фотохімічного смогу, кислотних дощів та вторинних аерозолів, а також негативно впливають на здоров'я людини. Проаналізовано основні механізми утворення оксидів азоту у суднових дизельних двигунах, зокрема термічний механізм, що домінує за високих температур згоряння. Узагальнено міжнародні екологічні вимоги та розглянуто сучасні методи зниження викидів NO_x , включаючи оптимізацію процесу згоряння, рециркуляцію відпрацьованих газів та селективне каталітичне відновлення.

Ключові слова: екологічна безпека, екологічні показники, емісія оксидів азоту, морський транспорт, рециркуляція випускних газів, селективне каталітичне відновлювання, судновий дизель, суднові енергетичні установки

Вступ. Морський транспорт є важливою складовою світової транспортної системи, проте водночас він залишається одним з джерел забруднення атмосферного повітря. У процесі експлуатації суднових енергетичних установок у довкілля надходять значні обсяги відпрацьованих газів, серед яких оксиди азоту посідають одне з провідних місць за ступенем негативного впливу. Посилення міжнародних екологічних вимог обумовлює необхідність детального аналізу причин утворення NO_x та розроблення ефективних шляхів їх зменшення.

Постановка проблеми. Інтенсивний розвиток морського транспорту супроводжується зростанням обсягів викидів забруднювальних речовин в атмосферу, серед яких оксиди азоту (NO_x) займають одне з провідних місць за рівнем екологічної небезпеки. Основними джерелами викидів NO_x у судноплавстві є суднові дизельні двигуни, в яких оксиди азоту утворюються внаслідок високотемпературного згоряння палива та взаємодії молекулярного азоту повітря з киснем.

Оксиди азоту є хімічно активними сполуками, що беруть участь у формуванні фотохімічного смогу, кислотних опадів та тропосферного озону, а також сприяють утворенню вторинних твердих частинок. Наявність підвищених концентрацій NO_x у повітрі негативно впливає на стан навколишнього середовища та здоров'я людини, зокрема на органи дихання і серцево-судинну систему. Особливо гостро ця проблема проявляється в припортових зонах та районах інтенсивного судноплавства.

Посилення міжнародних екологічних вимог, зокрема впровадження норм Додатку VI Конвенції MARPOL 73/78 та стандартів Tier I, II, III, суттєво обмежує допустимі рівні викидів оксидів азоту судновими енергетичними установками. Водночас експлуатаційні та конструктивні особливості суднових дизельних двигунів ускладнюють забезпечення відповідності цим вимогам без впровадження спеціальних технічних і технологічних рішень.

Таким чином, виникає науково-технічна проблема забезпечення ефективного зниження викидів оксидів азоту в атмосферу за збереження експлуатаційної надійності, паливної економічності та екологічної безпеки суднових енергетичних установок. Це зумовлює необхідність комплексного аналізу механізмів утворення NO_x та обґрунтування сучасних методів їх зниження, що відповідають чинним і перспективним міжнародним екологічним вимогам.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Проблема екологічності суднових енергетичних установок широко висвітлюється в наукових працях вітчизняних і зарубіжних дослідників. Існуючі публікації охоплюють питання вдосконалення конструкції суднових двигунів з метою зниження шкідливих викидів, а також розроблення додаткових технічних елементів, що можуть бути інтегровані без суттєвих змін конструкції судна. Окрему увагу приділено застосуванню альтернативних видів палива та паливних домішок для підвищення екологічних показників суднових енергетичних установок. Результати досліджень двигунів внутрішнього згоряння інших типів також розглядаються як основа для адаптації до умов суднової експлуатації [1-2, 5-18].

Мета дослідження. Метою дослідження є аналіз механізмів утворення оксидів азоту (NO_x) у суднових енергетичних установках та обґрунтування ефективних технічних і технологічних методів зниження їх викидів в атмосферу з урахуванням вимог Додатку VI Конвенції MARPOL 73/78, експлуатаційних особливостей суднових дизельних двигунів і забезпечення екологічної безпеки судноплавства.

Виклад основного матеріалу. На всіх етапах життєвого циклу суден – під час експлуатації, виготовлення, технічного обслуговування та ремонту – у навколишнє середовище надходять шкідливі викиди, що призводять до забруднення атмосферного повітря. Одним із найбільш екологічно небезпечних компонентів відпрацьованих газів суднових енергетичних установок є оксиди азоту (NO_x), які утворюються в процесі роботи дизельних двигунів внутрішнього згоряння [1,2].

Оксиди азоту належать до пріоритетних забруднювачів атмосфери через їх високу хімічну активність та здатність брати участь у вторинних фотохімічних процесах. У процесі згоряння палива за високих температур молекулярний азот повітря (N_2) взаємодіє з киснем з утворенням оксиду азоту (NO). У подальшому оксид азоту окиснюється до діоксиду азоту (NO_2). Сполуки NO та NO_2 у сукупності прийнято позначати як оксиди азоту (NO_x).

Оксид азоту (NO) за типових концентрацій у навколишньому середовищі не вважається безпосередньо небезпечним для здоров'я людини, однак діоксид азоту (NO_2) є високотоксичним газом. Він чинить подразнювальну дію на органи дихання, сприяє розвитку респіраторних та серцево-судинних захворювань і є одним із ключових чинників погіршення якості атмосферного повітря. Крім того, оксиди азоту беруть участь у процесах утворення фотохімічного смогу, кислотних дощів, тропосферного озону та вторинних твердих частинок, що значно посилює їх негативний вплив на екосистеми та здоров'я населення.

З огляду на екологічну небезпеку викидів NO_x виникає необхідність формування та впровадження міжнародних програм захисту навколишнього середовища у глобальному масштабі. На сьогоднішній день єдиною міжнародною організацією, рішення якої мають обов'язкову юридичну силу для всієї судноплавної галузі, є Міжнародна морська організація (ІМО) [3]. ІМО була створена Організацією Об'єднаних Націй з метою забезпечення безпеки судноплавства та запобігання забрудненню морського і повітряного середовища суднами.

У межах своєї діяльності ІМО розробила низку нормативних документів, спрямованих на обмеження шкідливих викидів із суден, зокрема відпрацьованих газів суднових енергетичних установок. Основним міжнародним документом у цій сфері є Міжнародна конвенція щодо запобігання забрудненню з суден (MARPOL 73/78). У 1997 році до Конвенції було прийнято Протокол, який включає Додаток VI «Правила запобігання забрудненню повітря суднами». Додаток VI MARPOL, що набрав чинності у 2005 році, встановлює гранично допустимі рівні викидів оксидів азоту для суднових дизельних двигунів [4].

Норми викидів NO_x відповідно до Додатку VI MARPOL встановлюються залежно від номінальної частоти обертання двигуна та поділяються на рівні Tier I, Tier II та Tier III. Стандарти Tier I та Tier II мають глобальний характер, тоді як вимоги рівня Tier III застосовуються до суден, що експлуатуються в зонах контролю викидів NO_x (NO_x Emission Control Areas, NECAs). Зазначені нормативні обмеження обумовлюють необхідність застосування ефективних технічних та технологічних методів зниження викидів оксидів азоту в суднових енергетичних установках [4].

У табл. 1. наведено граничні норми викидів NO_x для суднових двигунів.

Таблиця 1 - Граничні норми викидів NO_x для суднових двигунів (Додаток VI МАРПОЛ)

Рівень (Tier)	Дата побудови судна (на або після)	$n < 130$ об/хв	$130 \leq n < 2000$ об/хв	$n \geq 2000$ об/хв	Район дії
Tier I	1 січня 2000 р.	17,0	$45,0 \cdot n^{-0,2}$	9,8	Глобально
Tier II	1 січня 2011 р.	14,4	$44,0 \cdot n^{-0,23}$	7,7	Глобально
Tier III	1 січня 2016 р.*	3,4	$9,0 \cdot n^{-0,2}$	2,0	Зони NECA

Додаток VI МАРПОЛ запроваджує обмеження кількості шкідливих викидів NO_x, виділених із ВГ СЕУ. Обмеження шкідливих викидів NO_x прогресивно знижується. Норми викидів NO_x Tier III на 80% менше ніж норми викидів NO_x Tier I. Для забезпечення контролю викидів NO_x суднові двигуни повинні бути дообладнані (модернізовані) системами, які знижують рівень NO_x нижче відповідної норми Tier. Існує декілька методів зниження рівня шкідливих викидів NO_x СЕУ.

Присутність NO_x у викидах ВГ морського двигуна обумовлена високою температурою горіння, яка реагує з азотом у повітрі, що подається для згоряння палива. Зниження температури в циліндрі під час процесу згоряння, а отже зниження утворення NO_x може бути отримано за рахунок модифікації компонентів двигуна.

Наприклад, використання паливного інжектора, який унеможливує потрапляння палива в циліндр після горіння, забезпечує зниження температури циліндра та утворення NO_x. Крім того, зниження швидкості ходу поршня та раннє закриття впускних клапанів перед нижньою мертвою точкою (НМТ) призводить до розширення та охолодження повітря, що подається в циліндр, і внаслідок цього знижується утворення NO_x у викидах ВГ. Такий метод знижує викиди NO_x до 40%. Модернізуючи компоненти двигунів, провідні фірми виробники (MAN Diesel & Turbo, Wärtsilä та інші) виготовляють суднові двигуни, які відповідають вимогам міри Tier II [6].

Синхронізація та тиск упорскування палива впливають на утворення шкідливих викидів у циліндрі та на витрату палива двигуна. Синхронізація впорскування визначає, коли та який об'єм палива впорскується у циліндр двигуна. Для зниження викидів NO_x послідовність упорскування палива ділиться на три окремі фази: попереднє впорскування, основне впорскування та кінцеве впорскування. Така система впорскування називається дробовим упорскуванням.

Фаза попереднього впорскування починає попереднє згоряння палива у циліндрі, що забезпечує контрольоване згоряння палива у фазі основного упорскування. Цей процес зменшує пікову температуру в циліндрі, і отже, зменшує утворення викидів NO_x. Фаза основного впорскування палива призначена для отримання заданої потужності двигуна. Фаза кінцевого впорскування палива призначена для покращення змішування палива з повітрям під час пізньої фази основного згоряння, що зменшує кількість твердих частинок та сажі у вихлопних газах.

На рис. 1. представлено характеристику дробового впорскування базового двигуна [7]. Залежно від режиму експлуатації двигуна, синхронізація фази дробового упорскування регулюється. Електронна система керування працює незалежно від частоти обертання колінчастого валу (КВ) двигуна, що забезпечує синхронізацію. дробового упорскування палива.



Рисунок 1. – Характеристика дробового впорскування базового двигуна
Джерело [7]

Тиск упорскування палива впливає на наявність твердих частинок у ВГ. Чим вище тиск упорскування палива, тим більше палива розпорошується під час упорскування і поєднується з киснем в циліндрі. Це призводить до практично повного згоряння палива, що забезпечує одержання високого перетворення енергії. При цьому утворюється тільки мінімальна кількість твердих частинок та сажі у ВГ. Тиск упорскування палива у сучасних двигунах досягає до 2 200 бар. Крім зниження утворення шкідливих викидів, точний контроль синхронізації дробового впорскування палива під високим тиском може ефективно знизити витрати палива.

Використання водної емульсії та водного інжектора призводять до зниження температури циліндра. При використанні водної емульсії певна кількість води змішується з паливом у спеціальному обладнанні, призначеному для отримання якісної водопаливної емульсії. При застосуванні водного інжектора в головці циліндра встановлений окремий інжектор, через який певна кількість прісної води під тиском подається до циліндра. Цим знижується температура циліндра й утворення NO_x на 20...45%. Крім цього позитивного ефекту, такий метод забезпечує зниження питомої витрати палива для двигуна. Застосування цього методу на судах забезпечує вимоги Tier III.

Використання газового палива як моторного газу є одним із методів зниження забруднення випускних газів суднових двигунів азотистими сполуками. Застосування газового палива дозволяє суттєво скоротити кількість шкідливих викидів у порівнянні з паливом на основі нафти. Газові двигуни, що працюють з 1% запального дизельного палива, забезпечують вимоги Tier III щодо обмеження NO_x . Однак дана технологія вдосконалення газових дизелів знаходиться лише на стадії випробування.

Газові двигуни, які вже знаходяться в експлуатації, витрачають 3...5% запального дизельного палива та забезпечують лише вимоги Tier II.

Застосування вологого повітря для окислення палива у циліндрі дозволяє знизити викиди NO_x . Водяна пара змішується з повітрям, що подається в циліндр. Повітря, що проходить через компресор, має високу температуру та направляється до спеціальної комірки. Використовуючи насичену пару, що отримується від процесу дистиляції морської води, пара зволожує повітря. При цьому вологість повітря керується шляхом підтримки його температури від 60 до 70 $^{\circ}\text{C}$. Вміст водяної пари у повітрі знижує його пікову температуру, оскільки вода має більш високу теплоємність, ніж повітря. У результаті застосування вологого повітря знижується температура горіння в циліндрі, і отже, знижується утворення викидів оксидів азоту NO_x . Цей метод дозволяє знизити викиди NO_x до 70%.

У деяких випадках система рециркуляції вихлопних газів (EGR) застосовується для зниження викидів NO_x з двигунів. У системі EGR, частина вихлопного газу повторно, після процесу охолодження та очищення, циркулює до приймача надлишкового повітря для того, щоб змішувати ці гази з надлишковим повітрям, яке використовується для окислення палива.

Принципову схему роботи системи рециркуляції вихлопних газів (EGR) показано на рис. 2: 1 – турбокомпресор; 2 – охолоджувач надлишкового повітря; 3 – охолоджувач рециркулюючих ВГ; 4 – очищувач рециркулюючих ВГ.

Близько 50% зниження NO_x можна отримати шляхом використання EGR [20]. Однак,

максимально допустима кількість рециркулюючих вихлопних газів складається не більше 10% від сумарної витрати надлишкового повітря. При вищих відсотках вмісту вихлопних газів у надмірному повітрі, питома витрата палива двигуна та відходи інших викидів зростають.

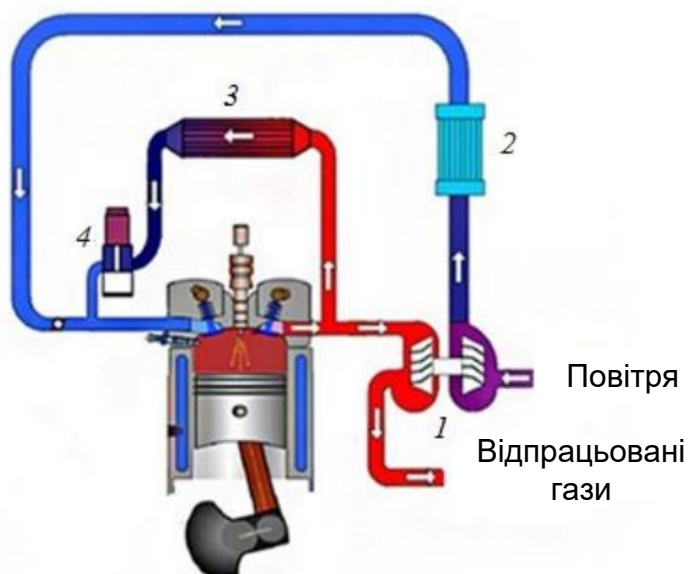


Рисунок 2 – Принципова схема роботи EGR
Джерело [8]

Найефективнішим методом скорочення викидів NO_x із суден є технологія селективного каталітичного відновлення NO_x аміаком (SCR). При застосуванні SCR зниження викидів NO_x може досягати 95%, що достатньо для задоволення найсуворіших екологічних вимог IMO Tier III [3]. Технологія SCR NO_x , незважаючи її високу будівельну вартість та високі експлуатаційні витрати, стає широко застосованим методом на судах для особливого зниження викидів NO_x .

Схема роботи SCR наведена на рис. 3. У цій системі відновник вводиться у ВГ перед тим, як гази входять до каталітичного реактора, де відбувається їх очищення від оксидів азоту. За відновник застосовуються аміак, аміачна вода або карбамід. Однак перед подачею ці відновники мають бути конвертовані до аміаку – NH_3 . Аміак з повітрям від компресора під тиском розпорошуються всередині газопотоку та аміак реагує переважно з NO_x вихлопних газів. Витрата аміаку становить залежно від потужності двигуна 8...9 г/кВт×год.

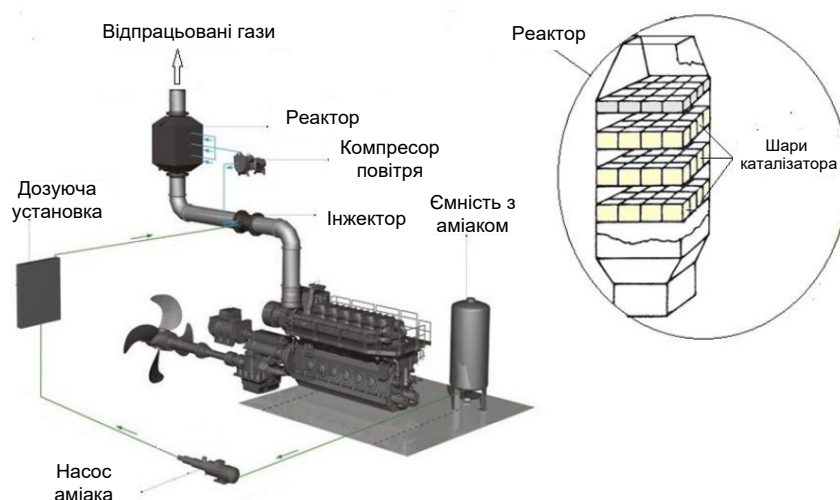


Рисунок 3 – Компонувальна схема системи SCR
Джерело [9]

Суміші ВГ з аміаком направляються в каталітичний реактор, який складається зі спеціального шару каталізатора, що стимулює реакцію між аміаком – NH_3 та NO_x ВГ. За каталізатор використовуються чотири типи найбільш активних каталізаторів: платинові, активні при температурі 150...200 °С; модифіковані на основі платини з температурою застосування 250...350 °С; оксидні титано-ванадієві, що використовуються при температурі 300...450 °С; цеолітні (на основі морденіту), активні при температурі 350...500 °С. Термін служби каталізаторів становить від 2 до 5 років. Для періодичного очищення каталізаторів застосовується повітря від компресора. Стиснуте повітря проходить між шарами каталізаторів та відокремлює сажу з поверхні каталізаторів.

Об'єм каталізатора становить близько 1 м³ на 1 МВт потужності двигуна. Конструкція реактора дозволяє забезпечити по перерізу реакційного простору сталість температури, оптимальні мольні співвідношення NH_3/NO_x та необхідний час хімічних реакцій. Хімічна реакція між аміаком – NH_3 та NO_x ВГ зменшує вміст NO_x до нешкідливого продукту N_2 .

У даному підрозділі роботи наведено методи, які широко застосовуються для зниження забруднення суднових ВГ азотистими сполуками. Залежно від прийнятої норми ІМО Tiers на судах застосовується будь-який із цих вищевказаних методів. На даний момент судові двигуни, дизельні та газові, можуть відповідати вимогам ІМО Tier II щодо зниження викидів NO_x , призначених для суден, що працюють у відкритому морі. Для виконання вимоги ІМО Tier III, призначеного для суден, що працюють у спеціальних зонах контролю викидів NO_x , необхідно застосовувати комбіновані методи, такі як використання системи дробового впорскування в двигуні із застосуванням системи EGR, або метод використання технології селективного каталітичного відновлення (SCR).

Висновки. У результаті дослідження встановлено, що оксиди азоту (NO_x) є одним із найбільш екологічно небезпечних компонентів відпрацьованих газів суднових енергетичних установок, утворення яких обумовлене високотемпературним згорянням палива. Посилення вимог Додатку VI Конвенції MARPOL 73/78, зокрема стандартів Tier II та Tier III, потребує впровадження ефективних технічних рішень для зниження викидів NO_x . Показано, що оптимізація процесу згоряння, дробове впорскування палива та застосування водяних технологій дозволяють суттєво скоротити утворення оксидів азоту. Найбільш ефективними методами зменшення викидів NO_x є системи рециркуляції вихлопних газів (EGR) та селективного каталітичного відновлення (SCR), які забезпечують відповідність вимогам рівня Tier III. Отримані результати можуть бути використані при модернізації суднових енергетичних установок і проєктуванні суден з підвищеними показниками екологічної безпеки.

ЛІТЕРАТУРА

1. Радченко, Р.Н. Тепловые нагрузки теплоиспользующей системы охлаждения наддувочного воздуха главного судового дизеля на рейсовой линии / Р.Н. Радченко, Н.С. Богданов // 36. наук. праць НУК. – 2015. – Вип. № 6 (462). – С. 77–83.
2. Зверьков Д.О., Сагін С.В. Зниження механічних втрат у суднових дизелях // Суднові енергетичні установки: наук.-техн. зб. – 2020. – Вип. 40. – С. 20-25. DOI : 10.31653/smf341.2020.20-25.
3. International Maritime Organization. *International Maritime Organization*. URL: <https://www.imo.org/> (date of access: 30.11.2025).
4. Міжнародна конвенція щодо запобігання забрудненню з суден (MARPOL 73/78). Додаток VI. Правила запобігання забрудненню повітря з суден. – London : International Maritime Organization, 2017. – 86 с.
5. Zverkov D.O., Sagin S.V. Reduction of mechanical losses in marine diesel engines // Ship power plants. – 2020. – № 41. – P. 20–25. DOI: 10.31653/smf341.2020.20-25.
6. 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. doi: <https://doi.org/10.15587/2706-5448.2023.290198>.
7. Солодовников В. Г. Застосування двоступеневої обробки палива для поліпшення робочих параметрів і експлуатаційних характеристик судового дизеля. *Суднові енергетичні установки* : наук.-техн. зб. 2014. № 34. Одеса : ОНМА. С. 130–137.
8. IJATES. URL: https://ijates.com/images/short_pdf/1464436108_161ijates.pdf (дата звернення: 25.11.2025).
9. Marine Engineering. *Marine Engineering*. URL: <https://www.meoexamz.co.in/2020/?m=1> (дата звернення: 25.11.2025).

10. Sagin S., Kuropyatnyk O., Matieiko O., Razinkin R., Stoliaryk T., Volkov O. Ensuring operational performance and environmental sustainability of marine diesel engines through the use of biodiesel fuel // *Journal of Marine Science and Engineering*. – 2024. – Vol. 12(8). – P. 1440. <https://doi.org/10.3390/jmse12081440>
11. Kuropyatnyk O.A. Selection of optimal operating modes of exhaust gas recirculation system for marine low-speed diesel engines / O.A. Kuropyatnyk // *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.
12. Побережний Р.В., Сагін С.В. Забезпечення екологічних показників дизелів суден річкового та морського транспорту // *Суднові енергетичні установки: наук. -техн. зб.* – 2020. – Вип. 41. – Одеса: НУОМА. – С. 5-9. DOI: 10.31653/smf340.2020.5-9.
13. Levchenko, O. V. (2014). *Sutnist i zmist orhanizatsiino-ekonomichnoho mekhanizmu upravlinnia lohistychnym potentsialom pidpriemstv zaliznychnoho transportu* [The essence and content of the organizational and economic mechanism for managing the logistics potential of railway transport enterprises]. *Zbirnyk naukovykh prats Derzhavnoho ekonomiko-tekhnologichnoho universytetu transportu. Seriya: Ekonomika i upravlinnia*, (29), 148–155.
13. Poberezhniy R.V., Sagin S.V. Ensuring the environmental performance of diesel engines in river and sea transport vessels // *Ship power plants*. – 2020. – Vol. 41. – P. 5-9. DOI: 10.31653/smf340.2020.5-9.
14. 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. Scientific journal*. – 2021. – № 7-8 – P. 36-43. <https://doi.org/10.29013/AJT-21-7.8-36-43>.
15. Сагін С.В., Заблоцький Ю.В., Сагін А.С. Підвищення економічності роботи суднових середньообертових дизелів // *Водний транспорт. Збірник наукових праць*. – 2025. – Вип. 1(42). – С. 166-179. doi.org/10.33298/2226-8553.2025.1.42.20.
16. Sagin S.V., Zablotskyi Y.V. Sagin A.S. Increasing the efficiency of ship's medium-speed diesel engines // *Water transport*. – 2025. – № 1(42). – С. 166-179. doi.org/10.33298/2226-8553.2025.1.42.20.
17. Сагін С.В., Заблоцький Ю.В. Діагностування технічного стану суднових енергетичних установок засобів водного транспорту // *Водний транспорт*. – 2023. – № 2(38). – С. 164-175. doi.org/10.33298/2226-8553.2023.2.38.18.
18. Sagin S.V., Zablotskyi Yu.V. Development of a method for diagnosing the technical condition of elements of the main power plant of water transport // 2023. – № 2(38). – С. 164-175. doi.org/10.33298/2226-8553.2023.2.38.18.
19. Levchenko, O. V. (2014). *Sutnist i zmist orhanizatsiino-ekonomichnoho mekhanizmu upravlinnia lohistychnym potentsialom pidpriemstv zaliznychnoho transportu* [The essence and content of the organizational and economic mechanism for managing the logistics potential of railway transport enterprises]. *Zbirnyk naukovykh prats Derzhavnoho ekonomiko-tekhnologichnoho universytetu transportu. Seriya: Ekonomika i upravlinnia*, (29), 148–155.

Стаття прийнята 01.09.2025