

© Давидов В.С., Ляшко О.В., Любарець І.О.

## ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ТА НАДІЙНОСТІ НАВІГАЦІЙНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ БЕЗПЕКИ ПЛАВАННЯ ВЕЛИКОГАБАРИТНИХ МОРСЬКИХ СУДЕН В ПРИБЕРЕЖНІЙ ЗОНІ ЗА ДОПОМОГОЮ ГІДРОАКУСТИЧНИХ СИСТЕМ

У статті запропоновано абсолютно новий, раніше не застосований на судах торгового та пасажирського флоту метод визначення місцезнаходження судна в прибережній зоні плавання із використанням підводних навігаційних гідроакустичних систем. Аналіз стану систем забезпечення безпеки судноплавства великогабаритних і великотоннажних суден у прибережних зонах плавання з підводними малоформатними навігаційними небезпеками у вигляді рифів або крутих підняття морського дна свідчить про те, що вони не повною мірою забезпечують безпеку мореплавства. Практика контролю за положенням суден відносно підводних навігаційних небезпек, яка склалася з 2003 року після введення в експлуатацію ГНСС GPS і ГЛОНАСС, здійснюється лише шляхом візуального представлення їх на електронній карті відносно високоточного положення судна. Це не дозволяє в автоматичному режимі контролювати відстань до підводних навігаційних небезпек і вчасно отримувати попереджувальні сигнали. Основним фактором безпеки під час плавання суден у прибережній зоні з наявністю підводних рифів або інших різких підйомів рельєфу дна є точне визначення відстані та напрямку до них за допомогою високоточних інструментальних методів.

**Ключові слова:** судноводіння, безпека на морі, навігація безпека судноплавства, навігація та управління, складні умови, великогабаритні судна, підвищення ефективності судноводіння, підводна навігаційна система, маяк-відповідач, гідроакустична станція, морський транспорт

**Постановка проблеми.** Аналіз навігаційної аварійності загалом свідчить, що друге місце за кількістю аварійних морських подій займають посадки суден на мілину, які, як правило, є наслідком значних похибок у визначенні місцезнаходження судна на траєкторії руху, особливо на циркуляції, а також нездатності учасників судноводіння забезпечити навігаційну безпеку в складних гідрографічних і гідрометеорологічних умовах. Райони прибережного плавання, обмежені умови гаваней і портів, що характеризуються відносно малими глибинами та високою інтенсивністю судноплавства, є місцем переважної кількості тяжких аварій. Найбільшу загрозу вони становлять для великотоннажних вантажних і пасажирських суден. Згідно з дослідженнями Європейського агентства з безпеки на морі (2021 р.), аварійність цих типів суден за останні сім років не зменшилася і залишається практично на тому ж рівні [1].

Впровадження на морських судах електронних картографічних навігаційних систем (ЕКНІС) і приймачів глобальних навігаційних супутникових систем (ГНСС), що значно автоматизували високоточний контроль місцезнаходження суден у режимі реального часу, не призвело до істотного зниження аварійності, зокрема пов'язаної з посадками на мілину. Використання функцій «завдання безпеки», «виявлення поточної небезпечної ізобати та небезпечних об'єктів», а також «автоматичного захоплення і супроводу цілей із накладенням зображення радіолокаційної станції (РЛС) на електронну карту (ЕК)» у сучасних ЕКНІС, що застосовуються при проведенні суден у прибережній зоні, каналах, акваторіях портів і гаваней, не вирішує в повній мірі завдання безпечного плавання великогабаритних суден у складних умовах.

Єдиним технічним засобом освітлення підводної обстановки на судах досі залишаються навігаційні ехолоти. Сучасні ехолоти дозволяють спостерігати за динамікою змін глибин безпосередньо під кілем судна, фіксувати перетинання характерних обмежувальних ізобат, автоматично подавати сигнали небезпеки при виході судна на критичні глибини. Проте вони не дозволяють своєчасно виявляти наближення судна до підводних рифів чи інших ізольованих підводних об'єктів, які не мають значного

підводного підйому навколо себе. Це зумовлено особливостями діаграми спрямованості гідроакустичних сигналів, що випромінюються антеною ехолота, яка практично перпендикулярна морському дну за рівного кіля судна. Відсутність на судах технічних систем, що дозволяють вимірювати навігаційні параметри у вигляді пеленгів і відстаней до підводних небезпек, призводить до посадок суден на рифи та мілини, а в окремих випадках — до їх загибелі.

Яскравими прикладами загибелі суден через зіткнення з ізольованими рифами, положення яких було позначене на електронних і паперових морських картах, є катастрофи пасажирського лайнера «Costa Concordia» 13 січня 2012 року біля берегів Італії та контейнеровоза «Рена» 5 жовтня 2011 року, що сів на риф Астролябія в прибережній зоні Нової Зеландії, спричинивши найбільшу екологічну катастрофу в історії країни [2,3]. Ці два судна, а також десятки тисяч інших, що нині експлуатуються, були оснащені сучасними навігаційними системами (ЕКНІС, ЗАПІ, GPS (DGPS), AIS та ін..) та мали визначене місцеположення з точністю диференціального режиму DGPS  $\pm 5$  м при P=63%. Проте це не запобігло зіткненню з рифами та загибелі суден.

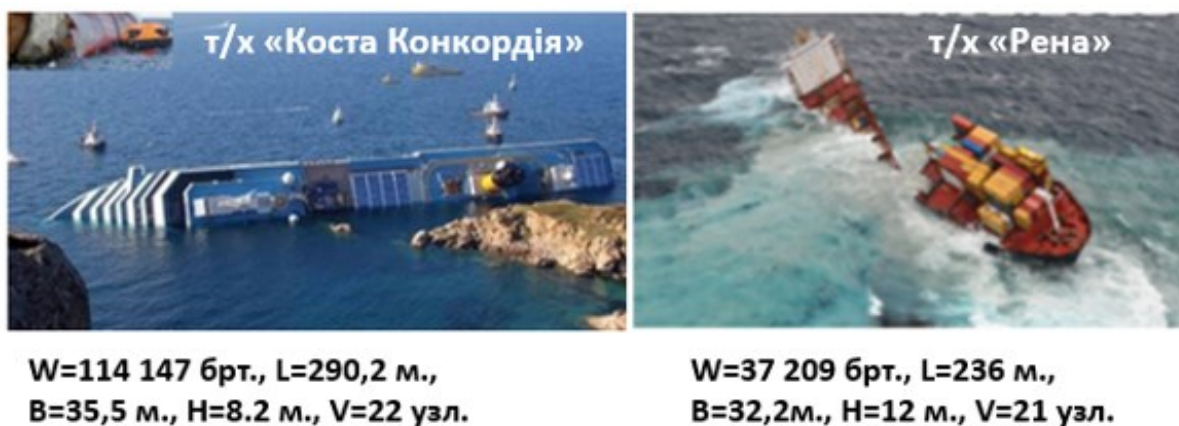


Рисунок 1 - Наслідки зіткнення з підводними рифами теплоходів «Коста Конкордія» і «Рена»

**Мета роботи.** Метою роботи є привернення уваги морської спільноти, дослідницьких організацій та суднобудівників до необхідності забезпечення безпеки мореплавства в прибережній зоні шляхом використання нових методів визначення місцеположення суден, заснованих на застосуванні підводних навігаційних систем (ПНС), які не залежать від складних гідрометеорологічних умов, що ускладнюють або повністю виключають візуальну та радіолокаційну видимість берегових орієнтирів, а також від факторів, що обмежують використання глобальних навігаційних супутникових систем (ГНСС) через потужні магнітні бурі або створення штучних перешкод. Окрім цього, ціллю роботи ще є обґрунтування принципу роботи ПНС для контролю місцеположення судна на заданій траєкторії руху шляхом спільного використання суднової гідроакустичної станції (ГАС) та підводних маяків-відповідачів.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** У зв'язку з недостатньою дослідженістю цього питання щодо конкретного використання підводних навігаційних систем на основі підводних маяків-відповідачів і суднових гідроакустичних станцій у судноводінні, воно практично не знайшло свого відображення в доступній літературі. Висловлені авторами міркування з цієї теми є новаторськими для суден торговельного флоту й здебільшого ґрунтуються на особистому практичному досвіді. Найбільш широко в літературі висвітлено гідроакустичні методи позиціонування підводних телекерованих апаратів за допомогою підводних маяків-відповідачів під час розробки нафтових і газових родовищ на континентальному шельфі, експлуатації підводних трубопроводів і прокладання підводних кабелів [4,5,6].

**Виклад основного матеріалу.** Повний перехід на автоматичне обсерваційне обчислення координат місцезнаходження судна на електронній карті за даними ГНСС призвів до поступового виведення з експлуатації радіонавігаційних систем усіх типів, зокрема й систем ближнього радіусу дії, таких як DECCA, які забезпечували безпеку мореплавства в прибережній зоні та на підходах до неї. Відповідно до

вимог ІМО, викладених у міжнародній конвенції SOLAS-74, для надійного забезпечення безпеки мореплавства місцезнаходження судна необхідно визначати щонайменше двома різнорідними методами. Однак усі наявні візуальні та радіолокаційні методи визначення місця судна не завжди дозволяють виконати цю вимогу. Визначення місцезнаходження судна за видимими береговими та небесними орієнтирами залежить від погодних умов, стану моря, опадів, дальності видимості маяків і навігаційних знаків. Радіолокаційні методи визначення місця судна також залежать від рівня хвилювання моря, наявності опадів, піщаних бур, а також здатності берегової лінії відбивати радіохвилі. Усі ці фактори зрештою знижують точність вимірювання навігаційних параметрів і відповідно, точність визначення координат, що може не відповідати умовам плавання. Більш ніж 20-річний досвід використання ГНСС в судноводінні виявив залежність можливості визначення місцезнаходження суден за допомогою навігаційних космічних апаратів від стану іоносфери під час сильних магнітних бур, а також чутливість до радіоелектронних перешкод або повного придушення сигналу внаслідок застосування засобів радіоелектронної боротьби у період збройних конфліктів і війн.

Аналіз стану та довгострокові прогнози міжнародних, зокрема наукових та гідрометеорологічних організацій свідчать про подальше погіршення погодних умов, зростання сонячної активності та їхній негативний вплив на експлуатацію морського та річкового транспорту загалом [7,8]. ООН у матеріалах Конференції з торгівлі та розвитку «Огляд морського транспорту 2022» (UNCTAD/RMT/2022) закликає «посилити заходи щодо нарощування потенціалу та збільшити прийнятне фінансування інфраструктури з метою забезпечення адаптації морських портів та інших ключових об'єктів транспортної інфраструктури в країнах, що розвиваються, до змін клімату та підвищення їхньої надійності» [7]. У доповіді Європейської економічної комісії ООН «Наслідки зміни клімату для міжнародних транспортних мереж та їхня адаптація» (Нью-Йорк і Женева, 2013 р.) наголошується на необхідності підвищення стійкості транспортних систем до впливу кліматичних факторів: «дослідження, представлене в доповіді, вказує на те, що випереджувальний підхід до адаптації транспорту до зміни клімату передбачає свідоме рішення виділяти кошти на розробку та впровадження відповідних адаптаційних планів, стратегій і заходів. Це буде складно не лише через витрати, пов'язані з цими заходами, а й тому, що такі заходи не є універсальними й складно відтворюваними за будь-яких умов» [8]. Ці серйозні попередження ООН щодо клімату потребують нових підходів до навігаційного забезпечення безпеки мореплавства в складних кліматичних умовах, а також створення принципово нових методів визначення місця судна.

Початок ХХІ століття ознаменувався активним будівництвом великогабаритних суден, водотоннажністю у сотні тисяч тонн, довжиною до 400 м, шириною до 65 м та осадкою до 23 м, які мають інші, по своєму особливі, маневрові характеристики та параметри керованості, в порівнянні із суднами традиційних розмірів. Одночасно з цим зросла й висота надводного борту, що досягає десятків метрів, що призвело до значного збільшення парусності, особливо для контейнеровозів і пасажирських суперлайнерів. Основні характеристики найбільших суден наведено в табл. 1.

За сукупного впливу всіх вищезгаданих несприятливих для визначення місцезнаходження судна факторів, під час плавання в прибережній зоні, судно може опинитися в умовах коли уточнення його поточних координат і контроль за місцезнаходженням на розрахунковій траєкторії руху буде неможливим.

Таблиця 1. – Порівняльна таблиця розмірів та маневрових характеристик різних типів великогабаритних суден

Характеристики суден	Контейнеровози типу «MSC Oscar»	Пасажирські судна типу «Oasis of the Seas»	Автомобілевози типу «Hoegh Target»	Балкери типу «Pacifik Vision»
Габарити : LxВxН (м)	395,4x59x73	360x47x72	199,9x36,5x80	362x65x30
Площа парусності, (кв.м)	22 000	22 400	13 833	8 000
Час/вибіг з ППХ на ПЗХ, (хв/м)	12,1 / 3400	5 / 1300	8,9 / 2800	17 / 4100
Час/вибіг з ППХ на стоп, (хв/м)	24,5 / 9260	22,4 / 8400	20,7 / 7600	29 / 10300
Осадка, (м)	16	9,3	10,3	23

Відповідно до вимог ІМО, викладених у міжнародній конвенції SOLAS-74 та інших керівних документах щодо планування рейсу судна, для надійного забезпечення безпеки мореплавства місцезнаходження судна необхідно визначати щонайменше двома різнорідними методами. Однак стало очевидним, що ця вимога ІМО не завжди виконується. До моменту входження судна в радіолокаційну або візуальну зону видимості навігаційних орієнтирів фактично єдиним способом визначення місця залишається використання ГНСС. Це зумовлює нагальну необхідність технічної розробки та впровадження у практику судноводіння більш технологічних та економічно менш затратних засобів навігаційного забезпечення на базі підводних гідроакустичних систем з елементами штучного інтелекту. Передусім це необхідно для великогабаритних і великотоннажних суден з великою осадкою та парусністю, значними гальмівними характеристиками та параметрами маневрування. З метою усунення впливу складних гідрометеорологічних умов на ефективність та надійність навігації великогабаритних суден пропонується використання гідроакустичних методів, заснованих на поширенні гідроакустичних імпульсів у морському середовищі [6, 9]. Подібні методи широко застосовуються в підводній робототехніці [4, 5] та підводній навігації у військово-морських флотах окремих країн світу. Для підводного судноплавства вже створені та використовуються підводні навігаційні системи (ПНС), що складаються з глибоководних підводних гідроакустичних маяків-відповідачів (МВ), координати розміщення яких визначаються з високою точністю (до 1-3 метрів), та корабельної гідроакустичної станції (ГАС). Один із авторів статті має багаторічний досвід експлуатації такої системи. Пропонується використання подібного підходу в практиці судноводіння вантажного та пасажирського флоту з урахуванням особливостей їхньої експлуатації.

Принцип визначення місцезнаходження судна на траєкторії руху з використанням гідроакустичного методу вимірювання дистанцій і пеленгів полягає в наступному. На судні за допомогою суднової ПНС, що включає пульт управління та антену ГАС, формується кодований сигнал запиту, який через активний тракт суднового гідролокатора випромінюється в напрямку маяка-відповідача (МВ). За запитом кодованого сигналу з судна МВ переходить із режиму очікування в робочий і, після розпізнавання кодованого сигналу за принципом збігу кодів, формує та випромінює через певний часовий інтервал ( $\tau_3$ ) сигнал гідроакустичної відповіді. Повторно випромінений сигнал приймається пасивним трактом суднового гідролокатора. За часом проходження сигналу, з урахуванням фактичної швидкості звуку у воді, розраховується похилена відстань. Для переведення похилої відстані в горизонтальну відстань необхідно врахувати глибину встановлення МВ, осадку судна та глибину моря.

На основі похилої дальності та глибини встановлення визначається горизонтальна дальність до МВ (перша лінія положення) за формулами 1.1-1.3:

$$D_n = C_{zv} \cdot \Delta \tau \quad 1.1$$

$$\Delta \tau = 0,5(\tau_{п} + \tau_{в}) - \tau_3 \quad 1.2$$

$$D_g = \sqrt{D_n^2 - H_{мв}^2} \quad 1.3$$

де,  $D_n$  – нахилена відстань;

$C_{zv}$  – швидкість звуку в воді;

$\Delta \tau$  – час відповідний відстані від судна до МВ;

$\tau_{п}$  – час проходження сигналу запиту від судна до МВ;

$\tau_{в}$  – час проходження сигналу відповіді від МВ до судна;

$\tau_3$  – час затримки сигналу в трактах ПНС;

$H_{мв}$  – глибина установки МВ;

$D_g$  – горизонтальна відстань між судном та МВ.

Другою лінією положення є гідроакустичний пеленг (Пга) на МВ. За цими двома полярними координатами (Пга, Дг) практично в режимі реального часу здійснюється позиціонування судна на траєкторії руху. У найбільш небезпечних для плавання великогабаритних суден районах доцільним буде встановлення декількох МВ, що дозволить підвищити точність визначення місцеположення суден на запланованій траєкторії руху.

Спрощена структурна схема роботи підводної навігаційної системи (ПНС) показана на рис.2.

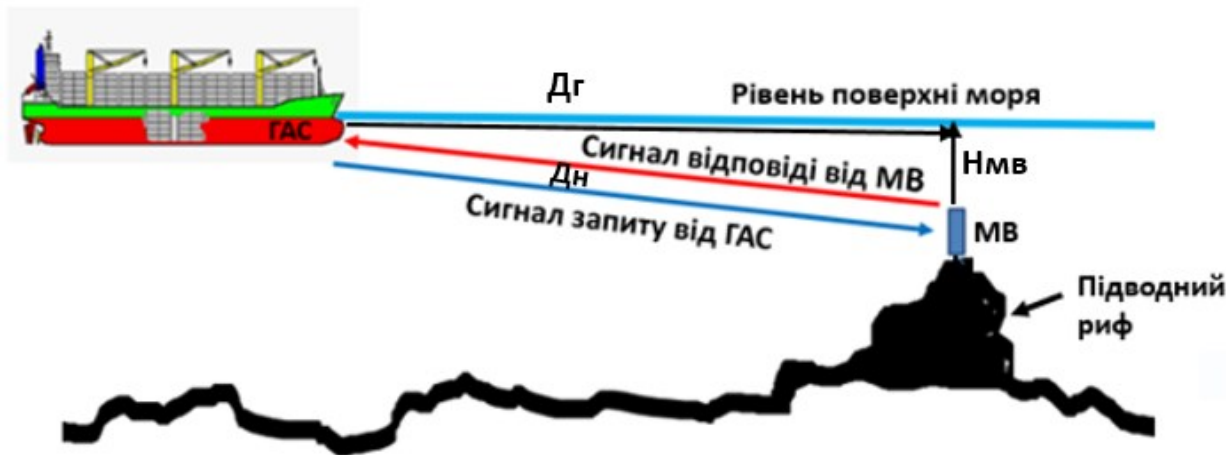


Рисунок 2 - Спрощена структурна схема підводної навігаційної системи

Таким чином, можна буде не лише визначати поточне місцеположення судна за пеленгами і відстанями до МВ, але, що ще важливіше, контролювати відстань до навігаційних перешкод. Коли опція ПНС буде інтегрована в ЕКДІС, стане можливим візуальне спостереження за траєкторією судна відносно підводних навігаційних небезпек на електронній карті, що дозволить своєчасно ухвалювати рішення про безпечне відхилення від них. Протягом століть людство створює берегові маяки для впізнання берегової лінії під час заходу суден у прибережну зону та визначення положення судна за видимими орієнтирами, але з невідомих причин відмовляється від широкого використання сучасних автоматизованих ПНС зі штучним інтелектом для цих цілей.

**Висновки.** Розташування підводних МВ далеко від берега на кордоні заходу суден у прибережну зону плавання значно підвищило б безпеку судноплавства та збільшило б час для прийняття компетентних рішень щодо запобігання аварійним ситуаціям. Використання підводних МВ не залежить від гідрометеорологічних умов і параметрів видимості. Завдяки простій конструкції ПНС є більш надійною у порівнянні з ГНСС, менш чутливою до різного роду перешкод і набагато дешевшою в експлуатації. Розгортання мережі ПНС з встановленням підводних МВ на входах до каналів і фарватерів, а також на осях глибоководних маршрутів для суден із великою осадкою створить більш сприятливі умови для безпечного судноплавства. Це особливо важливо в складних гідрометеорологічних умовах або в ситуаціях, коли неможливо використовувати ГНСС.

#### ЛІТЕРАТУРА

1. European Maritime Safety Agency, Annual overview of marine casualties and incidents 2021, 2022, Praça Europa 4, Lisbon Portugal Ares(2022).- P.1-14.
2. Italian Marine Casualties Investigative Body, COSTA CONCORDIA, Marine casualty on January 13, 2012, Report on the safety technical investigation;
3. Transport Accident Investigation Commission, Marine inquiry 11-204, Container ship MV Rena grounding, on Astrolabe Reef, 5 October 2011.
4. World Offshore Oil & Gas Production and Spend Forecast 2009-2013 (Douglas-Westwood and Energyfiles). [Електронний ресурс] режим доступу до ресурсу: <https://www.hydro-international.com/content/news/global-offshore-spending-forecast-2004-2013?output=pdf>.
5. Голод О.С. Перспективы и концепции разработки автономных необитаемых аппаратов./ Голод О.С., Гончар А.И., Шлычек Л.И. Гідроакустичний журнал (Проблеми, методи та засоби досліджень Світового океану, 2007.- №4.-102с..

6. Остроухов А.А., Комляков В.А., Монахов А.І. та ін. Гідроакустичні системи з маяками-відповідачами. Серія: Загальнотехнічна. – 1991. – Випуск 34.
7. UNCTAD, Review of Maritime Transport, UNCTAD/RMT/2022 and Corr.1.
8. United Nations economic commission for Europe, Climate Change Impacts and Adaptation for Transport Networks and Nodes, 2013, New York, Geneva
9. Давидов В.С., Демічев В.В., Мусорін О.О. Способ контролю местоположения ТПА на траектории движения с помощью судовой гидроакустической навигационной системы. Київ : ДП «УкрНДНЦ» Стандартизація, сертифікація, якість. Вип.№1(104), 2017, С.10-17.

#### REFERENCES

1. European Maritime Safety Agency, Annual overview of marine casualties and incidents 2021, 2022, Praça Europa 4, Lisbon Portugal Ares(2022).- P.1-14.
2. Italian Marine Casualties Investigative Body, COSTA CONCORDIA, Marine casualty on January 13, 2012, Report on the safety technical investigation;
3. Transport Accident Investigation Commission, Marine inquiry 11-204, Container ship MV Rena grounding, on Astrolabe Reef, 5 October 2011.
4. World Offshore Oil & Gas Production and Spend Forecast 2009-2013 (Douglas-Westwood and Energyfiles). [Electronic resource] access: <https://www.hydro-international.com/content/news/global-offshore-spending-forecast-2004-2013?output=pdf>.
5. Holod O.S. "Prospects and Concepts for the Development of Autonomous Unmanned Vehicles." / Holod O.S., Honchar A.I., Shlychek L.I. Hydroacoustic Journal (Problems, Methods, and Tools of World Ocean Research), 2007. - No. 4. - 102 pages.
6. Ostroukhov A.A., Komlyakov V.A., Monakhov A.I., et al. "Hydroacoustic Systems with Reply Beacons." Series: General Engineering. – 1991. – Issue 34.
7. UNCTAD, Review of Maritime Transport, UNCTAD/RMT/2022 and Corr.1.
8. United Nations economic commission for Europe, Climate Change Impacts and Adaptation for Transport Networks and Nodes, 2013, New York, Geneva
9. Davydov V.S., Demichev V.V., Musorin O.O. "Method of Monitoring the Location of ROV on the Trajectory of Movement Using Shipborne Hydroacoustic Navigation System." Kyiv: SE "UkrNDNC" Standardization, Certification, Quality. Issue No.1(104), 2017, pp. 10-17.

**Davydov V.S., Liashko O.V., Liubarets I.O.**

#### **Enhancing the efficiency and reliability of navigational support for the safety of navigation of large seagoing vessels in coastal waters using hydroacoustic systems**

*The article proposes a fundamentally new method, previously not applied on merchant and passenger vessels, for determining a vessel's position in coastal navigation areas using underwater navigational hydroacoustic systems. An analysis of the current state of safety assurance systems for the navigation of large-size and high-tonnage vessels in coastal waters containing small-scale underwater navigational hazards, such as reefs or steep seabed elevations, indicates that these systems do not fully ensure navigational safety. Since 2003, following the commissioning of GNSS GPS and GLONASS, the practice of monitoring vessel positions relative to underwater navigational hazards has been based solely on their visual representation on electronic charts with respect to the vessel's high-precision position. This approach does not allow for automatic monitoring of the distance to underwater navigational hazards or for the timely generation of warning signals. The primary safety factor for vessel navigation in coastal waters with the presence of underwater reefs or other abrupt seabed relief features is the accurate determination of the distance and bearing to such hazards using high-precision instrumental methods.*

**Keywords:** *navigational safety, navigation and control, challenging conditions, large-size vessels, enhancement of ship handling efficiency, underwater navigation system, beacon–transponder, hydroacoustic station.*

Стаття прийнята 05.09.2025

© Тимощук 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 відновлення, 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 безпеки. 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. Особливу 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<sub>x</sub>) 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<sub>x</sub>), 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<sub>2</sub>) взаємодіє з киснем з утворенням оксиду азоту (NO). У подальшому оксид азоту окиснюється до діоксиду азоту (NO<sub>2</sub>). Сполуки NO та NO<sub>2</sub> у сукупності прийнято позначати як оксиди азоту (NO<sub>x</sub>).

Оксид азоту (NO) за типових концентрацій у навколишньому середовищі не вважається безпосередньо небезпечним для здоров'я людини, однак діоксид азоту (NO<sub>2</sub>) 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<sub>x</sub> 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<sub>x</sub> 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<sub>x</sub> (NO<sub>x</sub> 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<sub>x</sub> для суднових двигунів.

Таблиця 1 - Граничні норми викидів NO<sub>x</sub> 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<sub>x</sub>, виділених із ВГ СЕУ. Обмеження шкідливих викидів NO<sub>x</sub> прогресивно знижується. Норми викидів NO<sub>x</sub> Tier III на 80% менше ніж норми викидів NO<sub>x</sub> Tier I. Для забезпечення контролю викидів NO<sub>x</sub> суднові двигуни повинні бути дообладнані (модернізовані) системами, які знижують рівень NO<sub>x</sub> нижче відповідної норми Tier. Існує декілька методів зниження рівня шкідливих викидів NO<sub>x</sub> СЕУ.

Присутність NO<sub>x</sub> у викидах ВГ морського двигуна обумовлена високою температурою горіння, яка реагує з азотом у повітрі, що подається для згорання палива. Зниження температури в циліндрі під час процесу згорання, а отже зниження утворення NO<sub>x</sub> 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<sub>x</sub>. 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<sub>x</sub> у викидах ВГ. Такий метод знижує викиди NO<sub>x</sub> 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<sub>x</sub> 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 згорання палива у циліндрі, що забезпечує контрольоване згорання палива у фазі основного упорскування. Цей процес зменшує пікову температуру в циліндрі, і отже, зменшує утворення викидів NO<sub>x</sub>. 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 згорання, 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.

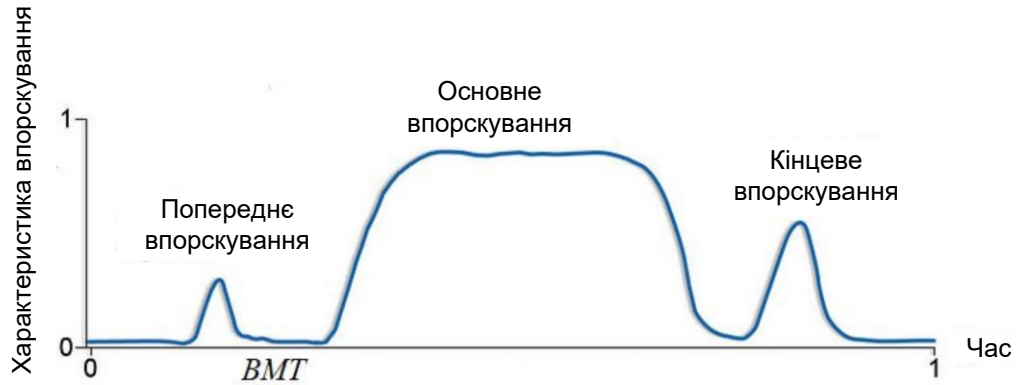


Рисунок 1. – Характеристика дробового впорскування базового двигуна  
Джерело [7]

Тиск упорскування палива впливає на наявність твердих частинок у ВГ. Чим вище тиск упорскування палива, тим більше палива розпоршується 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  $\text{NO}_x$  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  $\text{NO}_x$ . 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  $\text{NO}_x$ . 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  $\text{NO}_x$ . Цей метод дозволяє знизити викиди  $\text{NO}_x$  до 70%.

У деяких випадках система рециркуляції вихлопних газів (EGR) застосовується для зниження викидів  $\text{NO}_x$  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  $\text{NO}_x$  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.

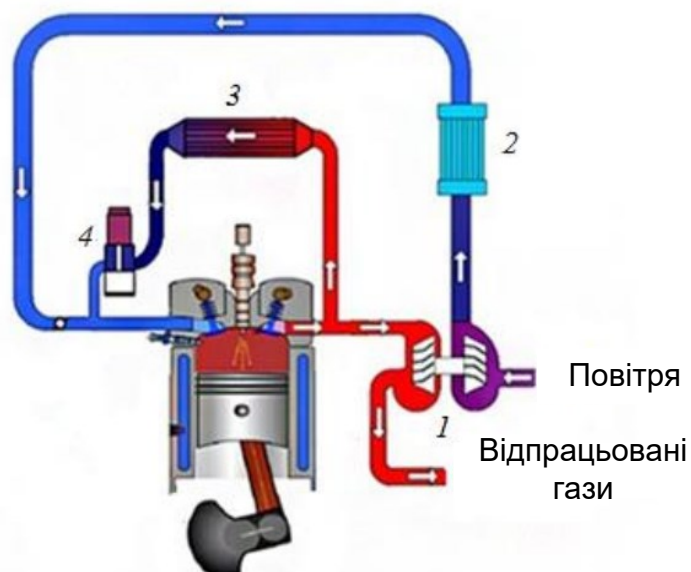


Рисунок 2 – Принципова схема роботи EGR  
Джерело [8]

Найефективнішим методом скорочення викидів  $\text{NO}_x$  із суден є технологія селективного каталітичного відновлення  $\text{NO}_x$  аміаком (SCR). При застосуванні SCR зниження викидів  $\text{NO}_x$  може досягати 95%, що достатньо для задоволення найсуворіших екологічних вимог IMO Tier III [3]. Технологія SCR  $\text{NO}_x$ , незважаючи її високу будівельну вартість та високі експлуатаційні витрати, стає широко застосованим методом на судах для особливого зниження викидів  $\text{NO}_x$ .

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 –  $\text{NH}_3$ . Аміак з повітрям від компресора під тиском розпоршуються всередині газоходу та аміак реагує переважно з  $\text{NO}_x$  вихлопних газів. Витрата аміаку становить залежно від потужності двигуна 8...9 г/кВт×год.

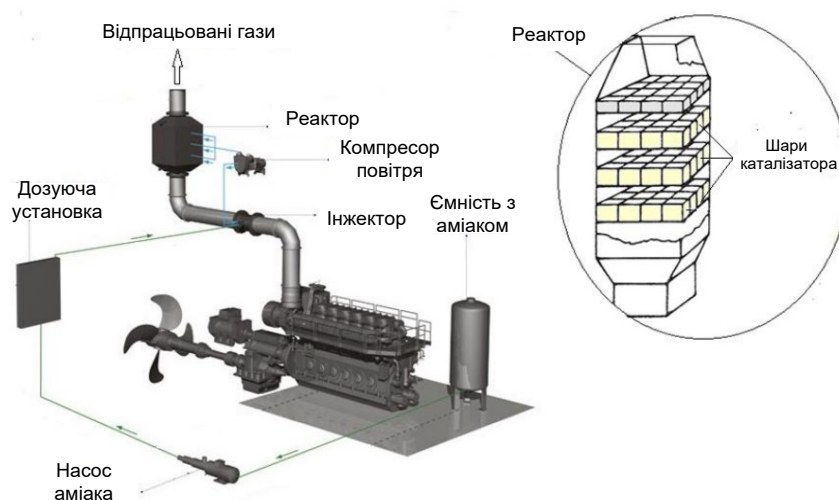


Рисунок 3 – Компонувальна схема системи SCR  
Джерело [9]

Суміші ВГ з аміаком направляються в каталітичний реактор, який складається зі спеціального шару каталізатора, що стимулює реакцію між аміаком –  $\text{NH}_3$  та  $\text{NO}_x$  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 м<sup>3</sup> на 1 МВт потужності двигуна. Конструкція реактора дозволяє забезпечити по перерізу реакційного простору сталість температури, оптимальні мольні співвідношення  $\text{NH}_3/\text{NO}_x$  та необхідний час хімічних реакцій. Хімічна реакція між аміаком –  $\text{NH}_3$  та  $\text{NO}_x$  ВГ зменшує вміст  $\text{NO}_x$  до нешкідливого продукту  $\text{N}_2$ .

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  $\text{NO}_x$ , призначених для суден, що працюють у відкритому морі. Для виконання вимоги ІМО Tier III, призначеного для суден, що працюють у спеціальних зонах контролю викидів  $\text{NO}_x$ , 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 ( $\text{NO}_x$ ) 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  $\text{NO}_x$ . Показано, що оптимізація процесу згоряння, дробове впорскування палива та застосування водяних технологій дозволяють суттєво скоротити утворення оксидів азоту. Найбільш ефективними методами зменшення викидів  $\text{NO}_x$  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](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. 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 середньооберткових дизелів // *Водний транспорт. Збірник наукових праць*. – 2025. – Вип. 1(42). – С. 166-179. [doi.org/10.33298/2226-8553.2025.1.42.20](https://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](https://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](https://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](https://doi.org/10.33298/2226-8553.2023.2.38.18).

*Стаття прийнята 01.09.2025*