

© Тимошук О.М., Левченко О.В.

ДОСЛІДЖЕННЯ МЕТОДІВ ЗНИЖЕННЯ ВИКИДІВ ОКСИДІВ СІРКИ В АТМОСФЕРУ

У статті розглянуто проблему викидів оксидів сірки (SO_x), що утворюються під час експлуатації суднових енергетичних установок при спалюванні морських палив із підвищеним вмістом сірки. Проаналізовано екологічні наслідки викидів SO_x для атмосферного повітря та морського середовища, а також чинні міжнародні вимоги Міжнародної морської організації, встановлені Додатком VI Конвенції MARPOL 73/78. Розглянуто глобальні та регіональні обмеження щодо вмісту сірки в судовому паливі, зокрема вимоги стандарту ІМО 2020 та зон контролю викидів SO_x . Проаналізовано основні технічні та паливні підходи до скорочення викидів оксидів сірки, включаючи використання альтернативних палив і судових систем очищення випускних газів. Показано, що застосування скрубєрних систем є ефективним і економічно доцільним способом забезпечення відповідності сучасним екологічним вимогам без радикальної модернізації судових енергетичних установок.

Ключові слова: випускні гази, екологічні показники, емісія оксидів сірки, охорона довкілля, очищення випускних газів, підготовка палива, скрубєрне очищення, суднове паливо, судовий дизель, судові енергетичні установки

Актуальність теми роботи. Посилення міжнародних екологічних вимог до судноплавства, зокрема запровадження глобальних і регіональних обмежень ІМО щодо вмісту сірки в судовому паливі, актуалізує проблему скорочення викидів оксидів сірки (SO_x) в атмосферу. Незважаючи на чинність стандарту ІМО 2020 та суворі вимоги в зонах контролю викидів SO_x (SECA), на більшості транспортних суден і надалі широко використовується важке високосірчисте паливо через його економічну доступність. Альтернативні низькосірчисті палива та газові енергоносії, хоча й забезпечують суттєве зниження або повне усунення викидів SO_x , супроводжуються значними фінансовими витратами, технічними складнощами переобладнання судових енергетичних установок (СЕУ) та обмеженнями інфраструктурного характеру.

У цьому контексті особливого значення набуває пошук і наукове обґрунтування ефективних, технічно здійсненних та економічно доцільних методів зниження викидів SO_x без радикальної зміни типу палива або силової установки. Одним із найбільш перспективних напрямів є застосування судових систем очищення випускних газів (скрубєрів), які дозволяють забезпечити відповідність вимогам Додатка VI МАРПОЛ у всіх зонах експлуатації суден. Дослідження ефективності, конструктивних особливостей та експлуатаційних аспектів таких систем є важливим для зменшення негативного впливу судноплавства на довкілля та забезпечення сталого розвитку морського транспорту.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Проблематика зниження викидів оксидів сірки судовими енергетичними установками є предметом великої кількості наукових досліджень у вітчизняній та зарубіжній науковій літературі. Значна кількість робіт присвячена аналізу екологічних наслідків використання високосірчистих морських палив та шляхам нейтралізації шкідливих компонентів відпрацьованих газів судових двигунів. Зокрема, у працях [1,2,7] розглянуто технічні підходи до зниження токсичності вихлопних газів і удосконалення систем очищення відпрацьованих газів судових дизелів.

У дослідженнях [3,9,11,12] значну увагу приділено питанням експлуатації судових дизельних двигунів, впливу якості палива на екологічні та енергетичні показники, а також проблемам забезпечення надійності судових енергетичних установок за умов посилення екологічних вимог. Роботи [18-21] присвячені застосуванню паливних присадок і методам підготовки важких палив з метою покращення їх екологічних характеристик, зокрема зменшення викидів SO_x та твердих частинок.

Окремий напрям досліджень стосується використання альтернативних рідких і газових палив у судових двигунах. У роботах [24-31] проаналізовано можливості застосування метанолу, диметилефіру, водопаливних емульсій, нафтового та природного газу, показано їх потенціал щодо зниження викидів оксидів сірки та інших шкідливих компонентів. Водночас автори відзначають наявність суттєвих технічних, економічних та інфраструктурних обмежень, що стримують широке впровадження таких рішень у морському транспорті [35-38].

У низці сучасних публікацій [27, 28, 32-34] розглянуто застосування судових систем очищення вихлопних газів (скруберів) як одного з найбільш ефективних способів забезпечення відповідності вимогам Додатка VI Конвенції MARPOL 73/78 при використанні традиційних високосірчистих палив. Показано, що такі системи дозволяють суттєво знизити викиди SO_x без необхідності радикальної модернізації судових енергетичних установок.

Разом з тим, аналіз наукових джерел свідчить, що питання комплексної оцінки ефективності різних методів зниження викидів оксидів сірки з урахуванням експлуатаційних, економічних та екологічних чинників залишається актуальним і потребує подальших досліджень. Це зумовлює необхідність проведення додаткового аналізу сучасних технічних рішень, спрямованих на зменшення негативного впливу судноплавства на атмосферне повітря.

Мета дослідження полягає в аналізі та науковому обґрунтуванні ефективних методів зниження викидів оксидів сірки (SO_x) у випускних газах (ВГ) судових енергетичних установок з метою забезпечення відповідності вимогам ІМО, зменшення негативного впливу судноплавства на атмосферне повітря та підвищення екологічної безпеки експлуатації морських суден.

Виклад основного матеріалу На всіх режимах експлуатації суден, так і під час їх будівництва, обслуговування та ремонту, в докілья виділяються шкідливі викиди, що забруднюють повітря. Одним із шкідливих викидів [5, 6], що видаляються з відпрацьованими газами судових є оксиди сірки – SO_x . Оксиди сірки – SO_x утворюються через наявність сполук сірки в морських паливах, що використовуються в СЕУ. Наявність сірки в паливі, що використовується на сьогоднішній день, досягає до 3,5% за масою.

Оксиди сірки – SO_x , що виділяються в атмосферу, перебувають у повітрі до 2...5 діб, далі окислюються, утворюючи сірчану кислоту, яка є основною причиною кислотних дощів. Спільно з оксидами азоту та сірки окис вуглецю – CO , що виділяється при спалюванні палива в двигунах внутрішнього згоряння (ДВЗ), мають спрямовану дію на рефлекторні системи людини. Двоокис вуглецю – CO_2 є основним джерелом парникового ефекту, тому йому приділяється найпильніша увага.

Ці викиди оксидів вуглецю підвищують середню глобальну температуру планети за рахунок поглинання сонячної енергії в атмосфері та пом'якшують різницю між денними і нічними температурами. Зростання вмісту в атмосфері парникових газів призводить до підвищення температури та танення льодовиків та загрожує прибережним мешканцям підвищення рівня моря. Саме двоокис вуглецю – CO_2 змінює погодні умови та вегетаційний період для продовольчих культур.

Димність випускних газів обумовлена наявністю в їх складі твердих та рідких аерозольних частинок. Маса цих частинок, які викидаються з випускними газами двигунів, порівняно мала. Приблизно 95...98% маси цих частинок складає суміш сажі, незгорілих вуглеводнів, сульфатів та інших включень. Сажа є продуктом неповного згоряння палива. Вихід сажі залежить від коефіцієнта надлишку повітря, типу сумішоутворення та якості палива. Суміш компонентів сажі, що викидаються з випускними газами ДВЗ може переноситися на значні відстані вітром, а потім осідати на землі чи у воді. Незважаючи на те, що ці частки регулюються як неспецифікована маса в повітрі, вони мають значний вплив на рослинність і екосистеми залежно від масового вмісту хімічних компонентів. Оскільки об'єми викидів нестаціонарні в часі та просторі, прогнозування регіональних впливів залишається складним процесом.

Забруднення атмосферного повітря внаслідок викидів оксидів сірки, що утворюються під час спалювання морських палив із підвищеним вмістом сірки, зумовило необхідність жорсткого міжнародного регулювання у сфері морського транспорту. Координація заходів щодо обмеження викидів SO_x у судноплавстві здійснюється на міжнародному рівні в межах діяльності Міжнародної морської організації (ІМО), нормативні документи якої є обов'язковими для виконання державами-учасницями [7]. Основна увага ІМО у сфері контролю викидів SO_x зосереджена на встановленні вимог до якості судових палив та запровадженні зон контролю викидів, у межах яких діють посилені екологічні обмеження.

Реалізація цих заходів спрямована на зменшення негативного впливу судноплавства на атмосферу та запобігання утворенню кислотних опадів у прибережних районах.

За час своєї діяльності ІМО вжила заходів, спрямованих на запобігання аварій танкерів, на мінімізацію забруднення навколишнього середовища через чищення нафтових танків та скидання відходів машинних приміщень. Також ІМО вжила заходів боротьби зі шкідливими викидами, що виділяються з ВГ СЕУ. Заходи ІМО щодо боротьби зі шкідливими викидами з суден містяться у «Міжнародній конвенції щодо запобігання забруднення водного середовища морськими суднами», відомої як MARPOL 73/78.

У 1997 році в Конвенцію MARPOL 73/78 було внесено поправки до «Протоколу 1997 року», який включає Додаток VI під назвою «Правила запобігання забрудненню повітря суднами». Додаток VI MARPOL, вперше прийнятий у 1997 році і набрав чинності 19 травня 2005 року, встановлює обмеження на викиди SO_x [8], що містяться у ВГ СЕУ суден та забороняє навмисні викиди озоноруйнівних речовин. У 2011 році ввели обов'язкові заходи до Додатку VI MARPOL щодо скорочення викидів парникових газів – CO_2 . У Додатку VI MARPOL додано новий розділ 4 «Заходи енергоефективності суден».

У Додатку VI MARPOL представлені межі вмісту сірки у паливі, яке використовується для СЕУ для контролю викидів SO_x і побічно викидів твердих частинок (відсутні явні межі контролю викидів твердих частинок). Межі допустимого вмісту сірки в паливі наведені в табл. 1 та представлені графічно на рис. 1

Таблиця 1 – Хронологія зміни вимог Додатку VI MARPOL щодо вмісту сірки у морському паливі

Регіон	2000	2010	2012	2015	2020
Глобальний	4,5%	-	3,5%	-	0,5%
Зони контролю викидів SO_x	1,5%	1%	-	0,1%	0,1%



Рисунок 1 – Зміна вимог додатку VI MARPOL щодо вмісту сірки у морському паливі

Необхідно відмітити, перспективні вимоги до вмісту сірки в паливі такі, що викиди SO_x в довкілля поступово знижувались для суднових двигунів. При цьому альтернативні межі також дозволені для скорочення викидів SO_x . Наприклад, якщо паливо з 1,5% сірки спалюється в двигунах, кількість викидів SO_x у ВГ становить до 6 г/кВт×год. Отже, якщо на судах застосовується високосірчисте паливо замість палива з 1,5% сірки, тоді потрібна система очищення сірки із ВГ для забезпечення контролю викидів $SO_x \leq 6$ г/кВт×год.

Усі судна, що збудовані після 2012 року, мають відповідати вимогам щодо енергетичної ефективності, яка оцінюється відповідно до Energy Efficiency Design Index (EEDI) та вимагають більшої енергоефективності. При цьому конструктори можуть вибрати будь-який метод для досягнення вимог EEDI в конкретному дизайні судна. Для розв'язання цього завдання для кожного судна розробляється окремий План управління енергетичною ефективністю (Ship Energy Efficiency Management Plan – SEEMP). Норми SEEMP, призначені для підвищення енергоефективності суден під час експлуатації.

Якщо судно має більшу енергоефективність при експлуатації, то менше спалюється палива для виконання призначеної роботи. Отже, менше парникових газів – CO₂ потрапляють у атмосферу.

Наявність сажі у випускних газах оцінюється двома вимірювальними коефіцієнтами ослаблення світлового потоку, якими є натуральний коефіцієнт – K, м⁻¹; відносний коефіцієнт – N, % [9]. У табл. 2 наведені співвідношення між наявністю сажі у ВГ та вимірювальними коефіцієнтами димності. Димність ВГ судового двигуна, що виявляє наявність сажі, визначається залежно від витрати ВГ – V_Г, м³/с. Гранично допустимий рівень димності ВГ наведено на рис. 2.

Таблиця 2 – Співвідношення між наявністю сажі у випускних газах та коефіцієнтами димності

Сажа, г/м ³	Одиниці виміру	
	N, %	K, м ⁻¹
0	0	0
0,025	10	0,245
0,050	20	0,519
0,100	30	0,829
0,125	40	1,188
0,212	50	1,612
0,325	60	2,131
0,430	70	2,800

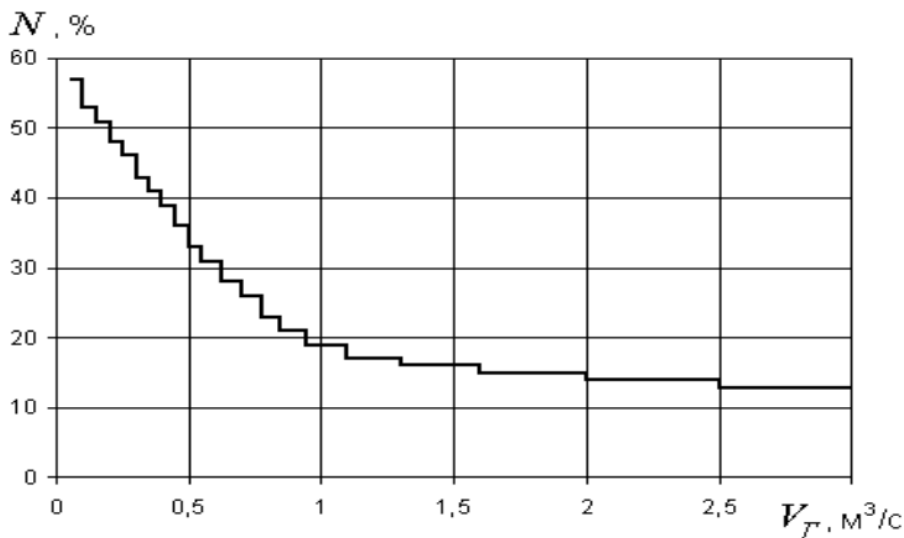


Рисунок 2 – Гранично допустимий рівень димності

Якщо судно відповідає нормам вимог ІМО, видається «Міжнародний сертифікат попередження забруднення повітря», термін дії якого становить до 5 років. В такий спосіб контролюються шкідливі викиди (NO_x, SO_x, CO₂, сажа та тверді частинки), що виділяються з ВГ СЕУ, для зменшення забруднення повітря.

Викиди оксидів сірки – SO_x обумовлені наявністю сірки в паливах, що використовуються в судових двигунах. Згідно з чинними правилами ІМО, максимальна глобальна межа вмісту сірки в судовому паливі становить 3,5%.

У зонах контролю викидів SO_x (SECAs) вміст сірки в паливі, що використовується на борту судна, нині не повинно перевищувати 0,1% за масою. Було затверджено глобальне обмеження рівня максимального вмісту сірки у судовому паливі. Цей стандарт набув чинності 1 січня 2020 року.

На даний час на транспортних судах широко використовується важке паливо – мазут, що має низьку ціну. Дане паливо є високосірчистим, оскільки у ньому міститься сірка до 3,5% за масою.

Вочевидь, що паливо, яке використовується в даний час на транспортних судах, не відповідає

вимогам майбутніх обмежень контролю ІМО викидів SO_x . Тому виконуються дослідження з пошуку, визначення та обрання різних методів зниження забруднення випускних газів сірчистими з'єднання для задоволення майбутніх вимог ІМО.

Глобальні вимоги щодо вмісту сірки в судовому паливі створили стимул використання чистішого палива з низьким вмістом сірки до 0,1% замість традиційного важкого палива з високим вмістом сірки.

Для судових двигунів використовуються марингазойл (MGO) та морське дизельне паливо (MDO) як джерела заміни важкого палива – високосірчистого мазуту [10]. Однак такі палива приблизно вдвічі дорожче ніж мазути, тому власникам транспортних суден не вигідно використовувати ці палива на судах. У деяких випадках робляться спроби для покращення морського палива і скорочення викидів SO_x в довкілля. Однією з цих спроб є змішування важкого мазуту з термічним паливом, переробленим із відходів пластмас [11]. Проте, практична реалізація є надто складною через деякі технічні проблеми і відсутності досвіду використання.

Також науковцями проводяться дослідження щодо використання альтернативних видів рідкого та газового палив у СЕУ для скорочення викидів SO_x з суден. До таких альтернативних видів палива можна віднести метанол [24], диметилефір [25], водопаливні емульсії [26, 27], нафтовий газ [28, 29, 30] та природний газ [31].

Проте за показниками теплотворної здатності та ефективності ці джерела енергії поки не досягають необхідного рівня, придатного для використання цих палив у судових двигунах.

Перспективним є застосування малосірчистого мазуту (M-100 із вмістом сірки до 0,1% за масою). Його властивості лежать у межах допуску ІМО. Цей мазут виходить традиційними методами перегонки з малосірчистої нафти, та його ціна лежить у межах ціни стандартних мазутів.

Одним із найбільш перспективних шляхів зниження шкідливих сірчистих викидів є переведення СЕУ на газове паливо. Застосування природного газу в двигунах внутрішнього згоряння дозволяє повністю виключити викиди сірки [32, 33, 34]. Однак досі в деяких країнах використання природного газу як моторного палива неможливо через відсутність берегової інфраструктури для постачання скрапленого природного газу на торгові судна [35, 36]. Крім того, модернізація СЕУ для переведення на газове паливо є складним завданням [37, 38]. Тому на жодних судах застосування даного методу зниження забруднення ВГ оксидами сірки ускладнено.

Висновок. У роботі встановлено, що викиди оксидів сірки (SO_x) судовими енергетичними установками суттєво впливають на забруднення атмосферного повітря та формування кислотних опадів. Аналіз вимог Додатка VI Конвенції MARPOL 73/78 показав, що контроль викидів SO_x здійснюється шляхом обмеження вмісту сірки в судовому паливі та впровадження зон SECA. Обґрунтовано, що використання судових систем очищення випускних газів є ефективним і технічно здійсненним способом забезпечення відповідності вимогам ІМО за збереження економічної доцільності експлуатації суден. Застосування скрубєрів дозволяє знизити викиди SO_x до рівнів, еквівалентних спалюванню палива з вмістом сірки не більше 0,1%.

ЛІТЕРАТУРА

1. Заблоцкий Ю.В. Исследование влияния органических покрытий на работу элементов топливной аппаратуры высокого давления судовых дизелей // Судовые энергетические установки: науч.-техн. сб. – 2015. – № 35. – Одесса: НУ ОМА. – С. 83-92.
2. Zablotsky Y.V. A study of the influence of organic coatings on the operation of high-pressure fuel system components of marine diesel engines // Ship power plants. – 2015. – № 35. – P. 83-92.
3. Зверьков Д.О., Сагін С.В. Зниження механічних втрат у судових дизелях // Суднові енергетичні установки: наук.-техн. зб. – 2020. – Вип. 40. – С. 20-25. DOI: 10.31653/smf341.2020.20-25.
4. 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.
5. 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.

6. 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.
7. Сагін С.В. Зниження енергетичних втрат в прецизійних парах паливної апаратури суднових дизелів / С.В. Сагін // *Суднові енергетичні установки : наук.-техн. зб. Вип. 38*. – Одеса : НУ «ОМА», 2018. – С. 139-149.
8. Сагін С.В., Столярик Т.О. Динаміка суднових дизелів під час використання моторних мастил з різними структурними характеристиками // *Автоматизація суднових технічних засобів : наук. -техн. зб.* – 2021. – Вип. 27. – Одеса: НУ«ОМА». – С. 108-119. DOI: 10.31653/1819-3293-2021-1-27-108-119.
9. Sagin S.V., Stoliaryk T.O. Dynamics of marine diesel engines when using motor oils with different structural characteristics // *Automation of ship facilities*. – 2021. – № 27. – P. 108-119. DOI: 10.31653/1819-3293-2021-1-27-108-119.
10. Солодовников В. Г. Обеспечение требований энергетической эффективности при подготовке тяжелых топлив для судовых двигателей внутреннего сгорания / В. Г. Солодовников // *Austria-science*. – 2017. – № 7. – С. 33-37
11. Марченко О.О., Сагін С.В. Вдосконалення процесу очищення суднових важких палив // *Суднові енергетичні установки: науково-технічний збірник*. – 2020. – Вип. 41. – Одеса: НУ«ОМА». – С. 10-14. DOI: 10.31653/smf341.2020.10-14.
12. Marchenko O.O., Sagin S.V. Improving the process of cleaning marine heavy fuels // *Ship power plants*. – 2020. – Vol. 41. – P. 10-14. DOI: 10.31653/smf340.2020.10-14.
13. Руснак Д.Ю., Сагін С.В. Забезпечення екологічних вимог при ультразвуковій десульфурізації вуглеводних палив // *Суднові енергетичні установки : наук.-техн. зб.* – 2020. – Вип. 40. – Одеса : НУ«ОМА». – С. 49-54. DOI: 10.31653/smf340.2020.49-54.
14. Rusnak D.Y., Sagin S.V. Ensuring environmental requirements during ultrasonic desulfurization of hydrocarbon fuels // *Ship power plants*. – 2020. – Vol. 40. – P. 49-54. DOI: 10.31653/smf340.2020.49-54.
15. 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>.
16. 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>.
17. Судновий механік: Довідник // Авт. кол.: За ред. А.А.Фока, д-ра техн. наук, судн. старшого механіка. – У 3-х т. – Т. 1. – Одеса: Фенікс. 2008. – 1036 с., с. 162 – 195.
18. Мацкевич Д.В., Сагін С.В., Ханмамедов С.А. Изменение реологических характеристик смазочных материалов в циркуляционной масляной системе в процессе эксплуатации среднеоборотного двигателя // *Судовые энергетические установки : науч.-техн. сб*, 2010. – Вып. 25. – Одесса: ОНМА. – С.109-118.
19. Matskevych D.V., Sagin S.V., Hanmamedov S.A. Changes in the rheological characteristics of lubricants in the circulating oil system during operation of a medium-speed engine // *Ship power plants*. – 2010. – № 25. – P. 109-118.
20. Шевченко В. А., Онищенко О. А. Проблеми удосконалення, підвищення енергетичної ефективності і тенденції розвитку складних суднових технічних систем і комплексів. *4th International scientific and practical conference "Perspectives of world science and education" (December 25-27, 2019) CPN Publishing Group, Osaka, Japan*. 2019, p.p. 995-1005.
21. Banisoleiman K., Rattenbury N. Reliability trends, operating issues and acceptance criteria related to exhaust gas turbochargers used in the marine industry// *A classification society view by Lloyd's Register, marine services*. - London, 2008. - September. 21-39 p.p.
22. Emission Project Guide. MAN B&W Two-stroke Marine Engines / MAN Diesel & Turbo Teglholmsgade 41 2450 Copenhagen SV, Denmark, 2017. -108 p. 4. HERE. Международный журнал компании «Альфа Лаваль». № 30. 2012. С. 10-13.
23. Sagin S.V., Kuropyatnyk O.O., Tkachenko I.V Ensuring the environmental friendliness of marine diesel engines of specialized ships // *Суднові енергетичні установки : науково-технічний збірник*. – 2022. – Вип. 45. – Одеса: НУ«ОМА». – С. 5-16. doi: 10.31653/smf45.2022.5-16.
24. Sagin S.V., Kuropyatnyk O.O., Tkachenko I.V. Ensuring the environmental friendliness of marine diesel engines of specialized ships // *Ship power plants*. – 2022. – № 45. – P. 5–16. doi: 10.31653/smf45.2022.5-16.
25. Kuropyatnyk O. A. Exhaust Gas Recirculation as a Major Technique Designed to Reduce NOx Emissions from Marine Diesel Engines / O. A. Kuropyatnyk, S. V. Sagin // *OUR SEA : International Journal of Maritime Science & Technology*. – 2019. – Vol. 66. – Iss. 1. – P. 1-9. <https://doi.org/10.17818/NM/2019/1.1>.
26. 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.
27. MAN B&W ME/ME-C/ME-GI/ME-B-TII engines [Electronic resource]. – Copenhagen, Denmark : MAN Diesel.

– 2010. – 357 p.

33. Сагин С. В. Определение диапазона стратификации вязкости смазочного материала в трибологических системах судовых дизелей // Вісник Одеськ. нац. мор. ун-ту. – 2019. – Вип. 1(58). – С. 89-100.

33. Sagin S.V. Determination of the range of lubricant viscosity stratification in tribological systems of marine diesel engines // Herald of the Odessa National Maritime University. – 2019. – № 1(58). – P. 89–100.

34. 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>.

34. 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>.

35. Varbanets R., Karianskiy A. Analyse of marine diesel engine performance // Journal of Polish CIMAC. Energetic Aspects. Gdansk: Faculty of Ocean Engineering and Ship Technology Gdansk University of Technology. 2012. Vol. 7. No. 1. P. 269–275.

36. Zablotsky Y.V. The use of chemical fuel processing to improve the economic and environmental performance of marine internal combustion engines/ Yu.V. Zablotsky // Materials of the International Conference “Scientific research of the SCO countries: synergy and integration”. Part 1. August 31, 2019. Beijing, PRC. – P. 131-138. DOI. 10.34660/INF.2019.15.36257.

37. Sagin S., Sagin A., Zablotskyi Y., Fomin O., Pišt'ek V., Kučera P. Method for Maintaining Technical Condition of Marine Diesel Engine Bearings // Lubricants. – 2025. № 13. – P. 146. <https://doi.org/10.3390/lubricants13040146>.

37. Sagin S., Sagin A., Zablotskyi Y., Fomin O., Pišt'ek V., Kučera P. Method for Maintaining Technical Condition of Marine Diesel Engine Bearings // Lubricants. – 2025. № 13. – P. 146. <https://doi.org/10.3390/lubricants13040146>.

38. Zablotsky Yu. V. Reducing of thermal factor of exit-gas system of marine medium-speed diesel engine due to the usage of fuel additives / Yu. V. Zablotsky // Science and Education : material of the XIII international research and practice conference, Munich, November 2nd – 3 rd, 2016. – Munich : Vela Verlag Waldkraiburg. – 2016. – P. 96-103.

39. Заблоцький Ю.В., Сагин А.С. Визначення динамічних навантажень під час зміни режимів мащення прецизійних пар паливної апаратури суднових дизелів // Суднові енергетичні установки : науково-технічний збірник. – 2022. – Вип. 44. – Одеса : НУ «ОМА». – С. 121-131. doi: 10.31653/smf44.2022.121-131.

39. Zablotskyi Yu.V., Sagin A.S. Determination of dynamic loads during the change of lubrication modes of precision pairs of fuel equipment of marine diesel engines // Ship power plants. – 2022. – № 44. – P. 121-131. doi: 10.31653/smf44.2022.121-131.

40. Dvulit Z.P., Levchenko O.V., Derkach D.M. Formation of marketing decisions in the enterprise management system // Menedzhment ta pidpriemnytstvo v Ukraini: etapy stanovlennia ta problemy rozvytku. – 2020 – Vol. 2(1). – P. 21–28. <https://science.lpnu.ua/sites/default/files/journal-paper/2020/jun/21855/st3.pdf>

Tymoshchuk O., Levchenko O.

RESEARCH OF METHODS FOR REDUCING SULFUR OXIDE EMISSIONS INTO THE ATMOSPHERE

The article examines the problem of sulfur oxide (SO_x) emissions generated during the operation of marine power plants when burning marine fuels with high sulfur content. The environmental consequences of SO_x emissions for the atmospheric air and the marine environment are analyzed, along with the current international requirements of the International Maritime Organization established by Annex VI of the MARPOL 73/78 Convention. Global and regional restrictions on sulfur content in marine fuel are reviewed, specifically the IMO 2020 standard requirements and Sulfur Emission Control Areas (SECAs).

The study analyzes the main technical and fuel-based approaches to reducing sulfur oxide emissions, including the use of alternative fuels and marine exhaust gas cleaning systems (EGCS). It is shown that the application of scrubber systems is an effective and economically viable way to ensure compliance with modern environmental requirements without radical modernization of marine power plants.

Keywords: exhaust gases, environmental performance, sulfur oxide emissions, environmental protection, exhaust gas cleaning, fuel preparation, scrubber cleaning, marine fuel, marine diesel, marine power plants.

Стаття прийнята 15.10.2025