10.31653/smf48.2024.114-125

Сагін А.С., Заблоцький Ю.В.

Національний університет «Одеська морська академія»

АНАЛІЗ ЕФЕКТИВНОСТІ МОРСЬКИХ ПЕРЕВАНТАЖУВАЛЬНИХ ТЕРМІНАЛІВ ПІД ЧАС ТРАНСПОРТУВАННЯ ЗРІДЖЕНОГО ПРИРОДНОГО ГАЗУ СУДНАМИ-ГАЗОВОЗАМИ

Постановка проблеми в загальному вигляді. Останніми роками попит на перевезення зрідженого природного газу (ЗПГ) значно зріс, що зумовлено глобальними змінами в енергетичній галузі. Країни по всьому світу прагнуть зменшити залежність від вуглеводнів і перейти на більш екологічно чисті види палива. ЗПГ став одним із ключових компонентів цього переходу, оскільки під час його згорання утворюється менше викидів вуглекислого газу порівняно з вугіллям і нафтовим паливом [1-3].

Зростання споживання ЗПГ особливо помітне в Європі та Азії, де держави активно диверсифікують свої джерела енергії. Будівництво нових терміналів для регазифікації та збільшення попиту на танкери, що транспортують ЗПГ (або liquefied natural gas – LNG) призвели до розширення флоту суден, призначених для його перевезення. Сучасні LNG-танкери (судна-газовози) оснащені передовими технологіями для забезпечення безпеки та ефективності перевезень, що також сприяє зростанню довіри до цього виду морського транспорту [4-6].

В умовах енергетичної кризи та змін на світовому ринку енергії перевезення зрідженого газу океанськими шляхами суднами-газовозами стає все більш затребуваним, а тенденції в цьому секторі вказують на подальше зростання та розвиток [7-9].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Через кризу в Червоному морі та загрози для судноплавства багато компаній, що займаються транспортуванням ЗПГ в країни Азії, приділяють увагу до альтернативних маршрутів навколо Африканського континенту. Щоб мінімізувати витрати та підвищити ефективність у більш тривалих перевезеннях, зростає інтерес до використання перевалочних баз. Такі бази дозволяють тимчасово зберігати або перевантажувати ЗПГ на інші судна-газовози, що дає змогу оптимізувати логістичні процеси та скоротити час перебування суден у морі.

Перевалочні бази, розташовані у стратегічних точках, таких як узбережжя Західної та Південної Африки, сприяють розвантаженню суден-газовозів, що прямують на великі відстані. Вони також забезпечують більш гнучке управління ланцюжком постачань і знижують ризик затримок через переповненість морських портів або нестабільність регіонів. Крім того, використання таких баз допомагає уникати підвищених витрат на паливо та забезпечує стабільність транспортування ЗПГ у фокусі зростаючих вимог до безпеки та надійності постачань [10, 11].

Обхід Африканського континенту, хоча й збільшує час транспортування та витрати на паливо, став більш пріоритетним варіантом для забезпечення безпеки вантажів і екіпажів морських суден. Це також впливає на глобальні логістичні ланцюжки та підвищує вартість транспортування ЗПГ, що в підсумку відображається на цінах для споживачів. Проте компанії продовжують адаптуватися до змін умов, приділяючи особливу увагу безпеці та надійності постачань. В даний час розглядається можливість будування перевалочних баз на шляху від міст здобичі в північних морях поблизу берегів Норвегії та на шляху до Європейських країн та країн Азії. Характеристики деяких перевантажувальних терміналів, що розташовані на шляху транспортування ЗПГ з Пивничної Європи до Азії наведені в таблиці 1.

Таблиця 1. Технічні характеристики перевантажувальних терміналів

Параметри	Регіон розташування терміналу	
	Норвегія	Південно-Африканська Республіка (ПАР)
Місцезнаходження	Узбережжя е Норвегії в місцях здобичі	Узбережжя ПАР поблизу Кейптауну
Пропускна спроможність	20 млн. тонн / рік	25 млн. тонн / рік
Об'єм сховища	2 плавучі сховища ЗПГ об'ємом 360 тис. $м^3$	2 плавучі сховища ЗПГ об'ємом 415 тис. $м^3$

Значне скорочення відстані та часу транспортування забезпечує зменшення обсягів утворення парів ЗПГ (Boil-off gas – BOG). Пари ЗПГ утворюються через різницю температур між ЗПГ та довкіллям внаслідок надходження тепла з довкілля через ізоляцію стінок суднагазовоза. Як правило, надлишкові пари ЗПГ збираються за допомогою системи рекуперації пари, повторно зріджуються та повертаються в рідкому стані до вантажних танків. За умовою відсутності на судна-газовозі системи повторного зрідження природного газу, надлишкові пари ЗПГ спалюють на факельній установці [12, 13].

Постановка завдання. Завданням дослідження був аналіз можливості використання морських перевантажувальних терміналів під час транспортування ЗПГ суднами-газовозами, а також визначення основних енергетичних потоків, що необхідні для забезпечення процесів завантаження /розвантаження ЗПГ на цих терміналах

Виклад основного матеріалу дослідження. Залежно від енергетичної установки судна-газовоза, надлишкові пари ЗПГ можуть використовуватися як паливо для теплових двигунів. Оскільки пари ЗПГ є цінним побічним продуктом, у світовій практиці дедалі частіше застосовують двохпаливні дизельні установки, здатні працювати на газі, при цьому важке мазутне або суднове дизельне паливо використовується як резервне паливо. Швидкість пароутворення для суден-газовозів становить 0,125 …0,13 % на добу від обсягу ЗПГ у вантажному танку. Наприклад, для судна-газовозу з місткістю вантажних танків 170000 м^3 утворюється близько 170…255 м^3 парів ЗПГ щоденно. Газ, що випаровується, становить приблизно 80…90 % енергії, необхідної судну-газовозу на повній потужності в завантаженому рейсі, і близько 40…50 % в баластному рейсі. Для продовження роботи судну-газовозу потрібно додаткове паливо або пара ЗПГ. У такому випадку можуть використовуватися форсовані випарники, які дозволяють випаровувати додаткову кількість ЗПГ. Слід зазначити, що під час морських перевезень через постійне випаровування ЗПГ зростає і теплота згоряння його парів. З часом цей факт може зменшити потребу в примусовому випаровуванні додаткової кількості ЗПГ [14, 15].

Оскільки поставки та відвантаження продукту можуть бути нерівномірними, з метою зменшення часу простою суден-газовозів в очікуванні розвантаження або завантаження ЗПГ передбачається можливість перевантаження ЗПГ з судна на судно за схемою «борт у борт» без проміжного зберігання на плавучих сховищах газу.

Під час вантажно-розвантажувальних операцій інтенсивність пароутворення може короткочасно збільшуватися в 1,5…2 рази. Основні причини пароутворення в процесі завантаження / розвантаження судна-газовозу представлені в таблиці 2. Надлишкові пари ЗПГ відводяться в спеціальний рукав на терміналі та далі в берегову систему повторного зрідження природного газу або можуть спалюватися на факельній установці. В останньому випадку (у зв’язку з тим, що спалювання парів ЗПГ пов’язано з використанням палива нафтового походження) необхідно підтримувати вимоги екологічних стандартів

щодо викидів в довкілля токсичних компонентів та забруднюючих речовин [16-18].

Таблиця 2. Основні причини пароутворення в процесі завантаження / розвантаження судна-газовоза

Причина пароутворення	Опис
Температурна різниця між ЗПГ та танком	Під час контакту ЗПГ з танком судна-газовоза виникає різниця температур, що сприяє випаровуванню ЗПГ
Подача теплоти через ізоляцію	Невелике, але постійне проникнення тепла через ізоляційні матеріали танка призводить до випаровування
Турбулентність під час бункерування	Під час бункеровки ЗПГ у танк створюється турбулентність, яка збільшує контакт парів ЗПГ та рідини, що підвищує теплообмін
Зовнішні температурні умови	Вплив навколишнього середовища, особливо за умовою високих температур, підвищує швидкість випаровування
Час контакту з відкритими поверхнями	Чим довше рідина перебуває на відкритих поверхнях, тим більша кількість ЗПГ випаровується
Теплота тертя під час перекачки	Під час перекачування ЗПГ відбувається тертя, яке призводить до утворення додаткової кількості парів

Регазифікаційні термінали призначені для прийому ЗПГ з суден-газовозів і підготовки природного газу до використання. На регазифікаційних терміналах ЗПГ зберігається в ізотермічних резервуарах і за потреби переводиться в газоподібний стан. Переведення ЗПГ в газоподібний стан відбувається в системі випаровування за допомогою нагрівання. Як прямий теплоносій зазвичай використовується морська вода, як проміжний теплоносій – пропан. Оскільки природний газ не має запаху, перед його подачею споживачам необхідна одоризація регазифікованого природного газу. Для одоризації застосовують етилмеркаптан або тетрагідротіофен [19-21].

В теперішній час як регазифікаційні термінали використовуються плавучі установки, здатні самостійно пересуватися на відстань до 2 морських миль від берегової лінії. Порівняно з наземними терміналами ЗПГ плавучі установки мають низку переваг: нижчу вартість; менший термін будівництва (близько 1..1,5 років – в порівнянні з наземним терміналом 3…5 років); менша площа та морське розташування мінімізує вплив на довкілля [22, 23].

Принципова схема регазифікаційного термінала надана на рис. 1.

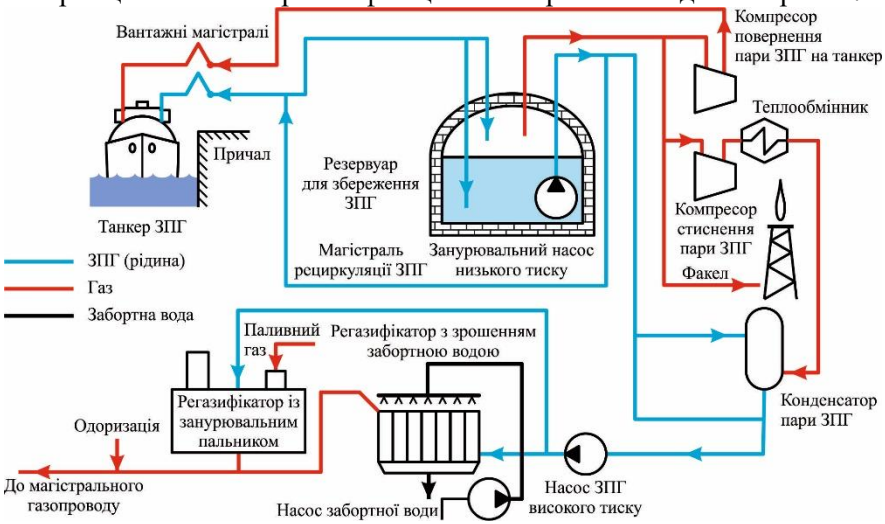

Рис. 1. Принципова схема регазифікаційного термінала

Традиційно інтенсивність пароутворення B_S виражається у відсотках від загального обсягу зберігання ЗПГ у резервуарі. Швидкість випаровування розраховується як:

$$f = B_S \frac{V_L \rho_L}{24};$$

де B_S – базова швидкість випаровування, що приймається в межах 0,05…0,1 % на добу;

V_L – обсяг ЗПГ у резервуарі, м^3;

ρ_L – густина ЗПГ.

В останні роки набуло поширення скориговане емпіричне рівняння

$$f = \frac{C_R B_S V_L \rho_L}{K_1 K_2 K_3};$$

де C_R – параметр, що враховує ефект «ролловер», викликаний витратою СПГ, що циркулює (зазвичай приймається рівним 1,2);

K_1, K_2, K_3 поправочні коефіцієнти, що враховують зміну тиску ЗПГ в резервуарі залежно від тиску парів ЗПГ, температури ЗПГ і температури довкілля відповідно [24, 25].

Загальний обсяг утворення парів ЗПГ з урахуванням змін швидкості пароутворення під час вантажних / розвантажувальних операцій можна виразити:

$$f = \beta_1 (P - P_V) + \beta_2 T_L + \beta_3 T_0 + \beta_3;$$

де $(P–P_V)$ – різниця між тиском газової фази в резервуарі, МПа;

T_L, T_0 – температури ЗПГ та довкілля відповідно, К;

β_1, β_2, β_3 – поправочні коефіцієнти;

β_4 – швидкість пароутворення за певних умов [26, 27].

Надмірна кількість парів ЗПГ видаляється з резервуара за допомогою компресорів і спрямовується до системи утилізації. Так підтримується постійний тиск ЗПГ у резервуарі. Для видалення надмірної кількості парів використовують компресори кількох типів: поршневі, роторні, осьові та відцентрові [28, 29].

Щоб підтримувати витрати парів ЗПГ у необхідному діапазоні, на регазифікаційних терміналах зазвичай використовується кілька багатоступінчастих компресорів паралельно. Загальне споживання енергії компресорами для стиснення парів ЗПГ можна розрахувати за виразами:

$$W^{BOG} = \sum_{i=1}^{n} W_i^{BOG},$$

$$W_i^{BOG} = \sum_{z=0}^{l} N^z t_i^z;$$

де W_i^{BOG} – потужність, яку споживає компресор i;

N^z – потужність, яку споживає компресор на рівні завантаження z;

z – кількість компресорів на рівні завантаження;

t_i^z – час роботи компресора i на рівні завантаження z.

Витрати енергії на роботу компресорів для стиснення парів ЗПГ слід враховувати, оскільки величина цих енерговитрат впливає на собівартість утилізації парів зрідженого природного газу.

Для підтримки кріогенної температури у вантажних магістралях використовується лінія рециркуляції ЗПГ (рециркуляційні трубопроводи). Підведення теплоти до рециркуляційного трубопроводу визначає вираз:

$$Q = f_{cycle} c_p \Delta T;$$

де f_{cycle} – масова витрата ЗПГ, що повертається на рециркуляцію;

c_p – питома теплоємність ЗПГ;

ΔT – різниця температур на вході та на виході рециркуляційного

трубопроводу.

Підведення теплоти Q до рециркуляційного трубопроводу також можна розрахувати за виразами:

$$Q = KA\Delta T_m,$$

$$\Delta T_m = \frac{T_{aut} - T_{in}}{\ln \frac{T_{aut} - T_0}{T_{in} - T_0}};$$

де K – загальний коефіцієнт теплопередачі;

A – площа теплпообміну;

T_{aut} – температура ЗПГ на виході;

T_{in} – температура СПГ на вході;

ΔT_m – середньологарифмічна різниця температур.

На регазифікаційному терміналі для перекачування ЗПГ із резервуару в конденсатор парів ЗПГ та для подачі охолодженого ЗПГ у трубопровід рециркуляції використовуються насоси низького тиску. Потужність насосів низького тиску залежить від витрати ЗПГ в режимах нагнітання і рециркуляції. Коефіцієнт корисної дії рідинних відцентрових насосів зазвичай становить від 70…75 %, відповідно 25…30 % енергії, витраченої в електродвигунах насосів, виділяється як теплота безпосередньо в резервуар для зберігання ЗПГ. Загальне споживання енергії насосами можна розрахувати за виразом:

$$W^{LP} = \sum_{j=1}^{m} W_j^{LP}, \quad j = 1, \ldots, m;$$

де j – індекс насосу;

W_j^{LP} – потужність, яку споживає насос низького тиску [24, 27].

Потужність, яку споживають насоси низького тиску, може бути знижена за рахунок зменшення масової витрати ЗПГ, який використовується для рециркуляції, що, однак, призведе до збільшення енергоспоживання компресорами для стиснення парів СПГ [30, 31].

Технологічні аспекти реалізації подібних проектів вивчені слабо, у зв'язку з цим виникає науково-технічна проблема раціональної організації процесів завантаження / розвантаження та зберігання ЗПГ на таких терміналах.

Специфіка роботи перевалочного ЗПГ терміналу зводиться до того, що він не пов'язаний із магістральним трубопроводом. На перевалочних терміналах типова система завантаження / розвантаження ЗПГ складається з завантажувально-розвантажувальних магістралей,

циркуляційних трубопроводів, що перекачують ЗПГ із суден у резервуари для зберігання та навпаки, занурювальних насосів низького тиску, компресорів та конденсаторів парів ЗПГ. Принципова схема перевалочного терміналу ЗПГ наведена на рис. 2.

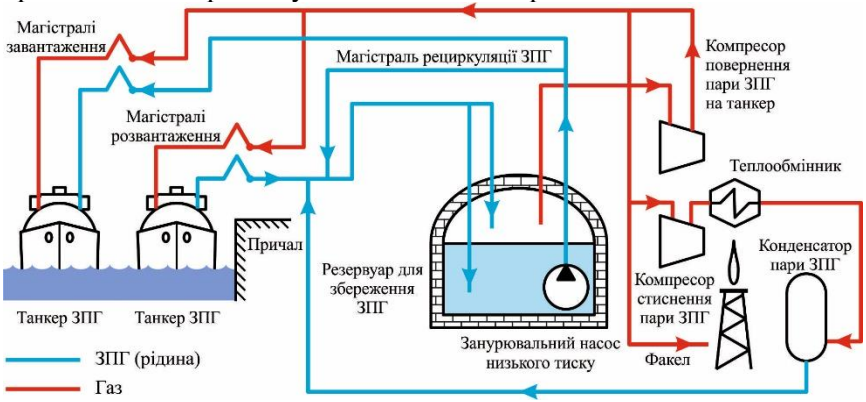

Рис.2. Принципова схема перевалочного терміналу ЗПГ

На перевалочному терміналі немає регазифікаційного вузла, тому надлишкові пари природного газу, що утворюються в резервуарі для зберігання, переконденсують і повертають назад до сховища або спалюють факельною установкою. Контроль тиску парів у вантажних танках під час завантаження /розвантаження судна-газовозу здійснюється за рахунок повернення частини парів із резервуарів для зберігання незаповненого простору танків. Таким чином, викид надлишкових парів ЗПГ в атмосферу не здійснюється. На відміну від регазифікаційних терміналів, на перевалочних комплексах ЗПГ зберігається у резервуарах короткими циклами. Цей факт може впливати на швидкість пароутворення у резервуарі. На початкових етапах випаровування швидкість пароутворення є постійною величиною. У міру випаровування ЗПГ, рідина, що залишилася, збагачується більш важкими вуглеводнями, і це має два термодинамічних наслідка. Температура кипіння та зміна величини прихованої теплоти пароутворення зростають. З часом у резервуарі спостерігається зниження інтенсивності пароутворення. Для аналізу технологічних процесів, що перебігають на перевалочному терміналі ЗПГ, можуть бути використані рівняння з представленого вище математичного апарату.

Висновки і перспективи подальших досліджень. Транспортування ЗПГ з родовищ вимагає наявності сучасного флоту, що відповідає всім вимогам транспортної та екологічної безпеки. Будівництво

та введення в експлуатацію суден-газовозів, а також створення перевантажувальних терміналів забезпечать безперервне перевезення вантажів не дивлячись на зміну умов небезпечного транспортування вантажів деякими районами Світового океану.

Перевантажувальні термінали можуть також використовуватися як розподільні газові хаби або для бункерування суден ЗПГ. Перевалочні термінали є важливою ланкою технологічного ланцюжка транспортування ЗПГ, при цьому є унікальними технічними спорудами, тому що завдання бункерування ЗПГ з танкерів великої вантажомісткості на звичайні судна-газовози знаходиться на стадії вивчення.

Специфіка роботи перевалочного терміналу ЗПГ полягає в тому, що він не пов'язаний з магістральним трубопроводом, а зберігання ЗПГ у резервуарах здійснюється короткими циклами. Попередня оцінка випаровування ЗПГ на таких терміналах дозволяє обґрунтувати технологічні рішення щодо їх пропускної спроможності, а також кількості ЗПГ, якій може на них зберігатися з метою подальшого перевантаження на інші судна-газовози.

Перелік використаних джерел

1. Sagin S.V., Sagin S.S., Fomin O., Gaichenia O., Zablotskyi Y., Pí˘st˘ek V., Ku˘cera P. Use of biofuels in marine diesel engines for sustainable and safe maritime transport // Renewable Energy. – 2024. – Vol. 224. – P. 120221. https://doi.org/10.1016/j.renene.2024.120221.

2. Sagin S.V., Kuropyatnyk O.A., Zablotskyi Yu.V. Gaichenia O.V. Supplying of Marine Diesel Engine Ecological Parameters // Nase More : International Journal of Maritime Science and Technology. – 2022.– Vol. 69(1). – P. 53-61. DOI 10.17818/NM/2022/1.7.

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

4. Kolegaev M.O., Brazhnik I.D. Main ways of tanker inert gas system modernization // Суднові енергетичні установки: наук.-техн. зб. – 2018. – Вип. 38. – Одеса : НУ «ОМА». – С. 200-216.

5. Sagin S., Kuropyatnyk O., Tkachenko I. 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.

6. Melnyk O., Onyshchenko S., Onishchenko O., Lohinov O., Ocheretna V., Dovidenko Y. Basic aspects ensuring shipping safety // Scientific Journal of Silesian University of Technology. Series Transport. – 2022. – № 117. – P. 139-149. DOI: https://doi.org/10.20858/sjsutst.2022.117.10.

7. Petrychenko O. Levinskyi M., Prytula D., Vynohradova A. Fuel options for the future: a comparative overview of properties and prospects // Transport Systems and Technologies. – 2023. – № 41. – P. 96-106. DOI: https://doi.org/10.32703/2617-9059-2023-41-8.

8. Sagin S., Kuropyatnyk O., Tkachenko I. 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.

9. Тимощук О.М., Дакі О.А., Бойко О.А., Карадобрій Т.А. Аналітичний огляд адаптивних систем керування судном та шляхи їх побудови // Водний транспорт. Збірник наукових праць. – 2020. – Вип. 3(31). – С. 120-125. https://doi.org/10.33298/2226-8553/2020.3.31.13.

10. 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.

11. Sagin S.V., Stoliaryk T.O. Comparative assessment of marine diesel engine oils // Austrian Journal of Technical and Natural Sciences. Scientific journal. – 2021. – № 7-8. – P. 29-35. https://doi.org/10.29013/AJT-21-7.8-29-35.

12. Сагін С.В., Матєйко О.В. Аналіз способів інертизації вантажних танків суден-газовозів // Суднові енергетичні установки : науково-технічний збірник. – 2023. – Вип. 47. – Одеса : НУ «ОМА». – С. 148-156. doi: 10.31653/smf47.2023.148-156.

13. Matieiko O. Selection of optimal schemes for the inerting process of cargo tanks of gas carriers // Technology Audit and Production Reserves. – 2024. – № 4(1(78)). – P. 43–50. https://doi.org/10.15587/2706-5448.2024.310699

14. Mrzljak V., Poljak I., Kosor M., Culin J. Bisection Method for the Heavy Fuel Oil Tank Filling Problem at a Liquefied Natural Gas Carrier // Journal of Marine Science and Engineering. – 2023. – Vol. 11. – 849. https://doi.org/10.3390/jmse11040849.

15. Бражнік І. Д. Изменение рабочих характеристик системы инертизации танкера за счет принудительной подачи газов // Науковий вісник Херсонської державної морської академії. Наковий журнал. – 2019. – № 1(20). – Херсон: ХДМА. – С. 4-11.

16. Sagin S.V. Decrease in mechanical losses in high-pressure fuel equipment of marine diesel engines // Materials of the International Conference “Scientific research of the SCO countries: synergy and integration”. Part 1. August 31, 2019. Beijing, PRC. – P. 139-145. DOI. 10.34660/INF.2019.15.36258.

17. Сагин С.В., Куропятник А.А. Оптимизация режимов работы системы перепуска выпускных газов судовых среднеоборотных дизелей // Автоматизация судовых технических средств : науч. -техн. сб. – 2019. – Вып. 25. – Одесса : НУ «ОМА». – С. 79-89.

18. Сагин С.В., Заблоцкий Ю.В. Влияние анизотропных жидкостей на работу узлов трения судовых дизелей // Проблеми техніки : наук.-виробн. журнал. – 2012 . – № 4. – Одесса : ОНМУ. – С. 68-81.

19. Руснак Д.Ю., Сагін С.В. Забезпечення екологічних вимог при ультразвуковій десульфурізації вуглеводних палив // Суднові енергетичні установки : наук.-техн. зб. Вип. 40. – Одеса : НУ «ОМА». – 2020. – С. 49-54. DOI : 10.31653/smf340.2020.49-54.

20. Сагин С.В. Реология моторных масел при режимах пуска и реверса судовых малооборотных дизелей // Universum: Технические науки. – 2018. – Вып. 3(48). – С. 67-71.

21. Сагин С.В., Поповский Ю.М., Гребенюк М.Н. Влияние ориентационной упорядоченности в граничных смазочных слоях на триботехничские характеристики узлов трения // Судовые энергетические установки: науч.-техн. сб. – 1998. – Вып. 1. – Одесса: ОГМА. – С.102-104.

22. Побережний Р.В., Сагін С.В. Забезпечення екологічних показників дизелів суден річкового та морського транспорту // Суднові енергетичні установки: науково-технічний збірник. – 2020. – Вип. 41. – Одеса: НУ «ОМА». С. 5-9. DOI : 10.31653/smf340.2020.5-9.

23. Мадей В.В., Сагін С.В., Волков О.М. Управління процесом впорскування під час використання в суднових дизелях паливних сумішей до складу яких входить паливо біологічного походження // Водний транспорт. Збірник наукових праць. – 2024. – Вип. 1(39). – С. 193-205. doi.org/10.33298/2226-8553.2023.2.38.21.

24. Li H.-C., Yu K.-W., Lien C.-H., Lin C., Yu C.-R., Vaidyanathan S. Improving Aquaculture Water Quality Using Dual-Input Fuzzy

Logic Control for Ammonia Nitrogen Management // Journal of Marine Science and Engineering. – 2023. – Vol. 11. – 1109. https://doi.org/10.3390/jmse11061109.

25. Lyridis D.V. Spot Charter Rate Forecast for Liquefied Natural Gas Carriers // Journal of Marine Science and Engineering. – 2022. – Vol. 10. – 1270. https://doi.org/10.3390/jmse10091270.

26. Manos A., Lyridis D., Prousalidis J., Sofras E. Investigating the Operation of an LNG Carrier as a Floating Power Generating Plant (FPGP) // Journal of Marine Science and Engineering. – 2023. – Vol. 11. – 1749. https://doi.org/10.3390/jmse11091749.

27. Wu S., Zhou X., Lu J., Liang D., Li D. Experimental Study on CH_4 Hydrate Dissociation by the Injection of Hot Water, Brine, and Ionic Liquids // Journal of Marine Science and Engineering. – 2023. – Vol. 11. – 713. https://doi.org/10.3390/jmse11040713.

28. Дакі О.А., Якусевич Ю.Г., Ліганенко В.В., Тришин В.В. Модель системи кондиціювання та охолодження повітря на сучасних нафтоналивних суднах і газовозах. // Водний транспорт: Збірник наукових праць. – 2022. – Вип. 1(35). – С. 121-127. doi.org/10.33298/2226-8553.2022.1.35.15.

29. Сагін А.С., Сагін С.В. Експериментальне визначення оптимальних фаз подачі палива в циліндр суднових дизелів // Водний транспорт. Збірник наукових праць. – 2024. – Вип. 1(39). – С. 206-215. doi.org/10.33298/2226-8553.2023.2.38.22.

30. Бражник И.Д. Модернизация процесса вентиляции грузовых трюмов танкера с помощью системы инертных газов // Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: технічні науки. – 2019. – Т.30(69). – Ч. 2. – № 5. – С. 129-133. https://doi.org/10.32838/2663-5941/2019.5-2/23.

31. Сагін С.В., Матєйко О.В. Особливості інертизації вантажних танків суден-газовозів під час транспортування вогненебезпечних речовин // Водний транспорт. Збірник наукових праць. – 2024. – Вип. 2(40). – С. 36-49. doi.org/10.33298/2226-8553.2024.2.40.03.