

*initial information are hull sensors and loading computer including on board sensors. Based on the selected grounding scenarios for certain types of vessels, parametric formulae can be derived to assess damage and contact forces between the vessel and the seabed, taking into account the load from still water, dynamic load from waves and tides, and local contact forces from the seabed. The decision support system integrates individual modules into a common data warehouse and a common human-machine interface. The most significant results are the development of the structure of the onboard decision support system and an appropriate method for managing a ship in a forced grounding, which allows decision makers to act effectively on board and ashore in selected critical scenarios. The significance of the obtained results lie in the development of a decision support method for controlling a ship in a degraded state when stranded, which is distinguished by the division of the grounding process into rigid body motion and resistance to penetration into the bottom structure, which is calculated on the basis of pre-established resistance dependencies, taking into account the degradation of the strength of the hull beams due to bottom damage and initial damage, thus allowing decisions to be made in real time and assessing the consequences of such an event (structural damages, water ingress or oil spillage). Thus, the studies have shown the effectiveness of the proposed approach for assessing ship control to limit sea loads so that hull damage does not spread to a critical level for the entire ship, and, in extreme cases, to assess the consequences of ship grounding.*

**Keywords:** *decision support system, navigation, ship, grounding, decision maker, ship framing, damage, oil spill.*

УДК 629.5

[doi.org/10.33298/2226-8553.2024.2.40.03](https://doi.org/10.33298/2226-8553.2024.2.40.03)**Сазін С.В., Матейко О.В.**

## **ОСОБЛИВОСТІ ІНЕРТИЗАЦІЇ ВАНТАЖНИХ ТАНКІВ СУДЕН-ГАЗОВОЗІВ ПІД ЧАС ТРАНСПОРТУВАННЯ ВОГНЕНЕБЕЗПЕЧНИХ РЕЧОВИН**

*Розглянуті особливості обробки вантажних танків суден-газовозів під час транспортування вогнебезпечних речовин. Визначено, що найбільш надійним способом запобігання пожежам та вибухам в вантажних танках є їх інертизація. Наведені способи інертизації вантажних танків суден-газовозів. Виконано аналіз основних технологічних операцій, що безпосередньо пов'язані з процесом транспортування вогнебезпечних речовин, а саме інертизації, дегазації, вакуумування. Надані діаграми для визначення вибухонебезпечних концентрацій суміші різних вантажів з киснем. Виконано аналіз основних особливостей наступних способів навантаження: навантаження із поверненням парів вантажу, навантаження без повернення парів вантажу, навантаження з іншого судна, навантаження хімічних продуктів. Визначено, що всі технологічні операції з приймання, перевезення та видачі скраплених газів як вантажу, що перевозяться суднами-газовозами повинні виконуватися з суворим виконанням умов, що забезпечують їх безпеку, а також з урахуванням вимог постачальників та замовників цих вантажів.*

**Ключові слова:** *вакуумування вантажних танків, дегазації вантажних танків, інертизація вантажних танків, інертний газ, морський транспорт, судна-газовози, транспортування зріджених газів.*

**Постановка проблеми у загальному вигляді та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями.** *Перевезення скрапленого газу суднами-газовозами є одним з розповсюджених способів транспортування енергоносіїв між континентами [1, 2]. Найбільш*

крупними постачальниками скрапленого газу є Іран, Катар, Саудівська Аравія та Об'єднані арабські емірати. Морські та океанські шляхи поєднують ці країни з країнами Європи, Північної та Америки, а також Китаєм, Японією та Австралією [3, 4]. Під час транспортування скрапленого газу через його вогнюнебезпеку постійно стає проблема забезпечення умов, які попереджують можливість випадкових, технологічних, фізичних або будь-яких інших умов виникнення самозаймання, спалаху, або вибуху вантажу. Крім того, перевезення різних вантажів, зміна одного вантажу на інший, а також баластні переходи вимагають спеціальної підготовки вантажних танків для подальшої експлуатації. Одночасно з цим, технологічні операції з транспортування скраплених газів повинні забезпечувати екологічні показники суден-газовозів та їх енергетичних установок [5-9]. Забезпечення безпеки як перевезення скраплених газів, також здійснення баластних переходів суден-газовозів неможливо без виконання інертизації та дегазації вантажних танків. Перша операція передбачає процес ізолювання атмосфери в об'ємі, які піддається інертизації, від зіткнення з вогненебезпечною поверхнею або вибухонебезпечним вантажем. Мета інертизації – досягнення такої залишкової концентрації парів вантажу в танку, величина якої менше нижнього граничного значення, за яким відбувається займання суміші парів вантажу з повітрям. Друга операція (дегазація) ставить своєю метою зведення значень концентрацій усіх шкідливих домішок у повітрі до таких, що не перевищують гранично допустимих за санітарними нормами [10, 11].

Інертизація та дегазація вантажних танків суден-газовозів може бути забезпечена в різний спосіб, при цьому різні вантажі вимагають різних варіантів цих технологічних операцій. Процеси інертизації та дегазації пов'язані з екологічною небезпекою суден та їх впливом на довкілля. Проведення інертизації та дегазації вантажних танків в акваторіях морських портів створює шкідливий вплив на атмосферу, а з часом (в зв'язку з осіданням небезпечних продуктів, що утворюються під час інертизації та дегазації) також на морське та континентальне середовище. Це змушує до проведення цих процесів в найбільш короткий час та з мінімальними викидами шкідливих речовин [12, 13].

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Кількість суден, що призначено для перевезення скрапленого газу зростає рік від року. Це пов'язано як зі збільшенням видобутку корисних копалин, також з щорічним підвищенням енергоспоживання усіма світовими країнами [14-16]. Транспортування зріджених газів (більшість з яких є вогненебезпечними речовинами) вимагає виконання послідовності технологічних операцій, що забезпечують завантаження подібних вантажів на борт суден-газовозів, безпечно їх збереження та підтримання їх характеристик під час морських та океанських переходів, а також вивантаження в порту призначення [17-19]. Перевезення скраплених газів передбачає окремі умови підготовки вантажних танків та обладнання до кожного з виду вантажу, підтримання окремих умов транспортування, а також очищення вантажних танків від залишків вантажу після його викачування на берегові приймальні комплекси.

**Формулювання цілей статті.** Ціллю статті є аналіз особливостей інертизації вантажних танків суден-газовозів під час перевезення вогненебезпечних речовин.

**Виклад основного матеріалу.** Забезпечення перевезення вогненебезпечних речовин суднами-газовозами неможливо без виконання спеціальних технологічних операцій з інертизації вантажних танків. При цьому, як інертний газ можуть використовуватися продукти згоряння палива, або газові компоненти окремих хімічних речовин. Інертний газ може містити складові, що викликають несподівані хімічні реакції з парами вантажу (в обмеженому просторі) [20, 21]. Вантажна система повинна бути обладнана таким чином, щоб проведення процесу інертизації було безпечною процедурою без утворення небезпечних «кишень» (об'ємів) газу. Крім того, вантажна система має бути обладнана технічними засобами для надійного берегового постачання. Порожні простори слід або інертизувати, або заповнити сухим повітрям – незалежно від вантажу, що перевозиться.

В інертному газі, що виробляється на судах-газовозах, вміст кисню ніколи не повинен перевищувати 5 %. Необхідно забезпечити існування надійної системи тривожної сигналізації для своєчасного попередження про перевищення небезпечного рівня кисню; ця сигналізація має

бути постійно включена. Слід також постійно і безперервно вимірювати вміст кисню та пари вогнебезпечного вантажу у вогнебезпечних просторах, а також здійснювати контроль за діаграмою вибухонебезпечних концентрацій для кожного вантажу.

Під час визначення кількості кисню, який може утримуватися в інертному газі, що використовується для інертизації, вирішальними факторами є деякі характеристики вантажу. Основні правила щодо виробництва та використання інертного газу містяться в розділі 9 Кодекс ІМО для газозовів.

Перед черговим навантаженням вантажу необхідно проводити зачистку танків і вільних порожніх просторів (тобто виконувати заповнення їх газом, що має низький вміст кисню) – для забезпечення вибухобезпеки. Зачистку слід проводити до тих пір, поки вміст кисню в атмосфері танка не опуститься нижче за вогнебезпечну межу. Максимально допустимий вміст кисню в інертному газі визначається Правилами Прапору або його встановлює судновласник.

Послідовність і кількість операцій, вироблених під час підготовки танків, залежить від хімічної сумісності попереднього і нового вантажів, і навіть від величини допустимої концентрації попереднього вантажу у новому. Цю величину регламентує фрахтувальник або відправник вантажу. Це вимагає проведення технологічної підготовки за такою схемою: інертизація – дегазація – повторна інертизація – очищення. Дегазацію у цьому разі виконують з метою економії інертного газу.

Для підготовки танків можуть бути застосовані методи вакуумування у поєднанні з впуском інертного середовища, а також продування. Також можуть використовуватись комбінації цих методів.

Під час вакуумування необхідний контроль та підтримання основних показників вантажу та процесу завантаження. Число циклів – вакуумування та впуску газу (інертного середовища, повітря, нового вантажу), необхідних для досягнення необхідної кінцевої концентрації попереднього вантажу в новому, залежить від прийнятого ступеня розрідження.

Ступінь розрідження визначається наступним виразом (виходячи з умов забезпечення герметичності та міцності танків):

$$m = \frac{P_{\text{п}}}{P_{\text{к}}},$$

де  $P_{\text{п}}$ ,  $P_{\text{к}}$  – значення тиску на початку і в кінці процесів вакуумування або впуску інертного газу відповідно.

Необхідна кількість циклів  $Z$  визначають як:

$$Z = \frac{\ln C / C_{\text{п}}}{\ln m},$$

де  $C_{\text{п}}$ ,  $C$  – початкова та поточна концентрації в танку попереднього вантажу відповідно;  
 $m$  – ступінь розрідження.

Як показують розрахунки, метод продування є більш ефективним щодо економії енерговитрат та необхідного часу. Однак під час використання цього методу витрата інертного середовища виявляється дещо вищою, ніж під час вакуумування. Тим не менш у цьому випадку, є можливість зменшити витрату інертного середовища, якщо здійснювати продування кількох танків, з'єднаних послідовно. Особливість такої схеми продування полягає в тому, що за умовою послідовного з'єднання перший по ходу продування танк відключають в момент досягнення в ньому необхідного значення концентрації попереднього вантажу. У ланцюг продування відповідно підключається наступний танк. Під час послідовного з'єднання танків подача інертного газу здійснюється одночасно у всі танки. Лише тільки в одному з танків досягається необхідне значення концентрації попереднього вантажу, подача інертного газу до

нього припиняється. Використання методу послідовного продування здатне привести до досягнення відчутних переваг за витратами часу та інертного середовища. За витратою пари нового вантажу цей метод практично не відрізняється від описаного вище методу вакуумування.

Припускаючи, що у танку відбувається миттєве перемішування залишків вантажу з продувним газом, можна визначити час, що необхідний для отримання в танку необхідної концентрації попереднього вантажу [22, 23]. Цей час з достатньою точністю розраховується за наступною наближеною формулою

$$t = \frac{1}{k} \ln \frac{C_1 - C_{\text{п}}}{C_1 - C},$$

де  $t$  – необхідний час продування;

$k$  – кратність обміну (під час вакуумування або продування);

$C_1$  – концентрація попереднього вантажу в інертному середовищі, що подається;

$C_{\text{п}}$  – початкова концентрація;

$C$  – необхідна концентрація попереднього вантажу в танку.

Кратність обміну розраховують окремо для методу вакуумування та для методу продування.

Кратність обміну під час вакуумуванні визначають як

$$k_{\text{в}} = V_h / V_{\text{т}},$$

де  $V_h$  – об'ємна характеристика компресора;

$V_{\text{т}}$  – обсяг оброблюваного танка.

Кратність обміну під час продування знаходять за виразом

$$k_{\text{п}} = V_{\text{в}} / V_{\text{т}},$$

де  $V_{\text{в}}$  – подача вентилятора.

Справжні значення цих величин можуть відрізнятися від розрахункових. Викликано це тим, що в різних танках можуть існувати різні форми газообміну – залежно від геометричної форми танка, відносного розташування його патрубків, що забезпечують потрапляння вантажу в танк та його вихід з танку. Також на форми газообміну впливають режими течії струменів і співвідношення густини продувного повітря та вантажу [24, 25].

Забороняється використовувати інертний газ відразу після проходження ним сепаратора, оскільки його точка роси на кілька градусів перевищуватиме температуру забортної води. У разі використання фреонової холодильної установки для охолодження інертного газу його температуру можна знизити до  $-55^{\circ}\text{C}$ . Оскільки інертний газ проходить через осушувальну установку, меншою стає небезпека забивання вантажної системи льодом.

На рис. 1 наведено діаграму, призначену для розрахунку вибухонебезпечних концентрацій етилену (у суміші з киснем).

На діаграмі зміна складу суміші, пов'язана з додаванням повітря або інертного газу, представлена переходом вздовж прямих ліній до їхньої верхньої точки  $A$  (чисте повітря). У міру збільшення концентрації інертного газу необхідно опускатися лініями вниз до точки  $G$  на осі вмісту кисню. Заштрихована на діаграмі ділянка визначає значення концентрацій суміші, за якою вона стає вогнебезпечною. Іншими словами, лінії, що відповідають інертним сумішам, та розташовані праворуч від лінії  $G-A$ , проходять через вогнебезпечні умови під час газовипускної операції (під час змішуванні з повітрям). Площа, що розташована ліворуч від

лінії  $G - A$  відповідає складу суміші, яка стає безпечною під час розрідження. безпосередньо лінія  $G - A$  має назву лінії критичного розрідження.

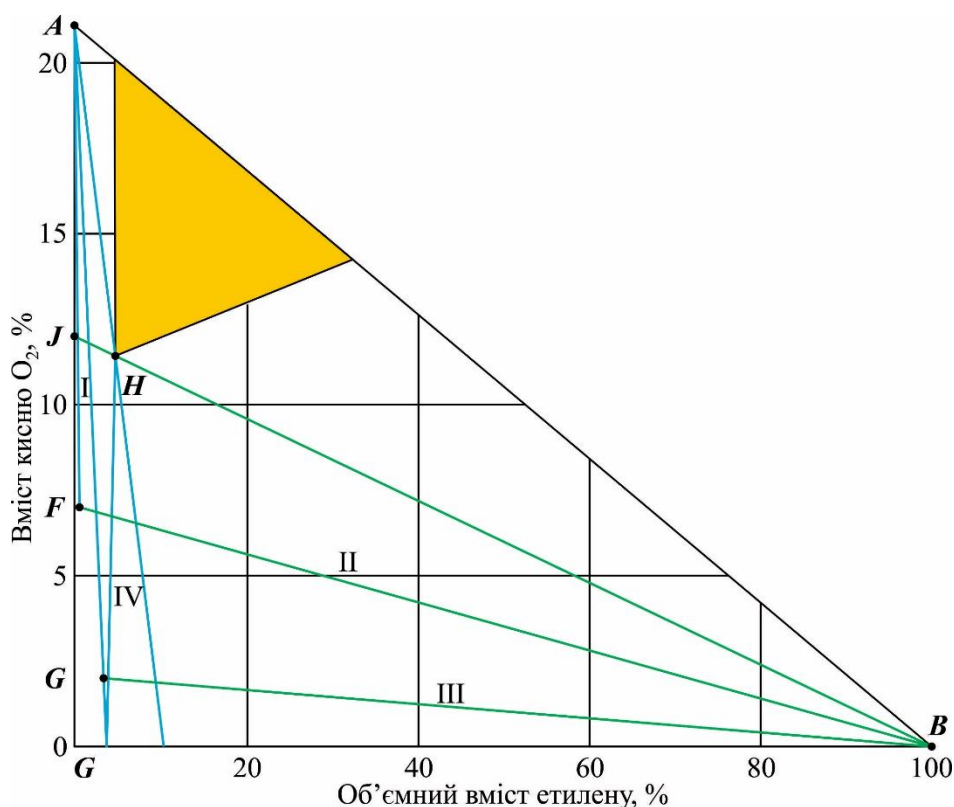


Рисунок 1 – Діаграма вибухонебезпечних концентрацій для етилену та кисню:

I – інертизація після атмосферного повітря; II – зачищення інертним газом;  
 III – зачищення після вивантаження; IV – очищення газу атмосферним повітрям

Найбільш розповсюдженою речовиною, що використовується для забезпечення процесу інертизації, є азот.

Якщо продукти, що транспортуються, вступають у реакцію з вуглекислим газом  $\text{CO}_2$  або іншими компонентами звичайного інертного газу, або якщо вони вимагають дуже низького вмісту кисню, замість звичайного інертного газу використовують азот. Його отримують з берегових сховищ та завантажують через берегові з'єднання в колектор. Танки та трубопроводи необхідно інертизувати азотом з берега. На судах, що використовують ручну інертизацію із застосуванням азоту, існують системи, що передбачають підведення азоту з берега. Найбільш прийнятний азот для зачистки танків та інертизації після перевезення аміаку. Азот можна отримувати також за допомогою спеціальної установки, що розділяє повітря [26, 27].

Іноді під час перевезення аміаку інертизацію замінюють дегазацією, тобто продувають танки повітрям. Для забезпечення безпеки необхідно знати та враховувати значення граничної концентрації вибуху аміачно-повітряної суміші, швидкість наростання тиску вибуху та максимальну величину цього тиску. Слід також мати уявлення про можливість флегматизації аміачно-повітряних сумішей із застосуванням різних добавок. Ці особливості визначаються діаграмою, що наведена на рис. 2. Діаграма необхідна для визначення вибухонебезпечних концентрацій суміші вуглеводнів або аміаку з киснем та інертним середовищем під час дегазації танків на газовозах. На діаграмі позначено нижню і верхню межі вибуховості аміачно-повітряної суміші: 14 % і 26 % вмісту аміаку відповідно.

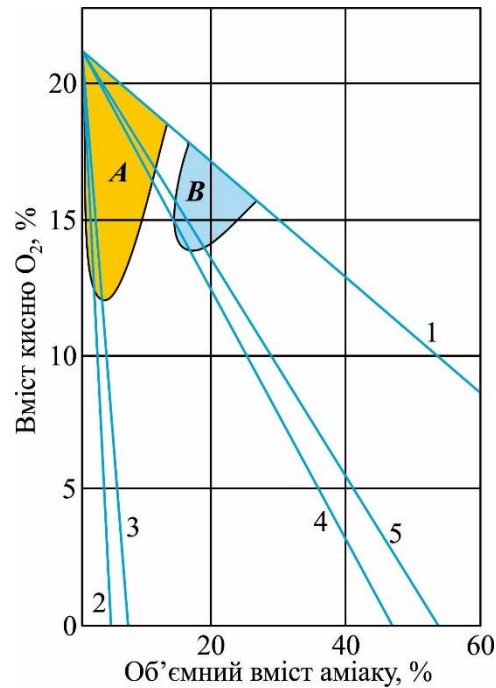


Рисунок 2 – Діаграма для визначення вибухонебезпечних концентрацій суміші аміаку з киснем:

*A* – область вибухонебезпечних концентрацій суміші з повітрям; *B* – область концентрацій аміачно-повітряної суміші

На діаграмі також зображено визначення вибухонебезпечних концентрацій кисню. Область *A* відповідає вибухонебезпечним значенням концентрацій суміші повітря з вуглеводнями, область *B* – таким самим значенням для аміачно-повітряної суміші. Лінія 1 відповідає процесу дегазації. Лінії 2 і 4 відповідають граничним випадкам дегазації без утворення вибухонебезпечних сумішей для вуглеводнів та аміаку відповідно. Точки перетину цих прямих з віссю абсцис вказують значення концентрацій пального газу в суміші з інертним середовищем, що не містить кисню.

Після перевезення аміаку інертизацію вантажних танків азотом необхідно проводити за вміст азоту близько 40...44 %. Після такої інертизації можна здійснювати продування танків повітрям. За умовою більшої концентрації палива в суміші з інертним середовищем процес дегазації (прямі 3 і 5 на рис. 2) буде вибухонебезпечним.

Під час отримання азоту, він надходить з берега рідинним трубопроводом – по верхній лінії. Це означає, що азот вводиться в танки через верхню лінію, що впорскує, і витісняє атмосферу, що знаходиться в танку. Витіснена атмосфера (з парами вантажу) через нижню лінію, що впорскується, відводиться на берег по зворотному паровому трубопроводу. Для надійної інертизації насоса та трубопроводу слід кілька разів відкрити та закрити розвантажувальний клапан.

Ще однією особливістю вантажних операцій на судах-газовозах є заходження танків. Заходження вантажних танків здійснюють безпосередньо перед прийомом вантажу, а також для підтримки зниженої температури у танках під час баластових переходів. Процес заходження дуже енергоємний, але його раціональне здійснення значно підвищує економічність перевезень зріджених газів морським шляхом.

Вантажні танки метановозів починають заходжувати приблизно за добу до початку вантажних операцій – для того, щоб запобігти температурному перенавантаженню конструкцій цих танків.

Заходження вантажних танків, які перебувають у постійній експлуатації, здійснюють тільки шляхом розпилення зрідженого газу всередині танка. На метановозах природний газ

надходить через спеціальні сопла (яких може бути 10...12), що розташовують у верхній частині вантажного танка. Протягом перших двох-трьох годин охолодження танка розпилення проводять з продуктивністю приблизно 1000 кг/год, потім продуктивність зростає у 5...6 разів. Після закінчення 14...18 год подібної операції температура вантажного танка сягає  $-115^{\circ}\text{C}$ . За такого значення температури вже можна робити завантаження танків метаном.

Зріджений природний газ, що використовується для охолодження танків, під час баластових переходів зберігається в одному з танків. Газ, що випарувався під час заохолодження танків, надходить через систему газів, що виходять, в головну суднову електроенергетичну установку, в якій успішно спалюється. Кількість метану, що випаровується, наприклад, становить 0,18...0,22 % його загальної маси за добу.

Заохолодження танка метановоза, що заново вводиться в експлуатацію, починають з триразового провітрювання танка та його просушування.

Для просушування вантажних танків використовується сухе повітря, що подається всередину танка, з точкою роси  $-25^{\circ}\text{C}$ . Танк можна вважати просушеним, коли повітря, що виходить з нього, матиме точку роси  $-20^{\circ}\text{C}$ . Потім сухе повітря витісняють із танка інертним газом з точкою роси  $-45^{\circ}\text{C}$ . Підготовка танка закінчується тоді, коли точка роси інертного газу, що виходить з танка, становить  $-40^{\circ}\text{C}$ . Міжбар'єрний простір перед охолодженням зазвичай заповнюють інертним газом під надлишковим тиском, оскільки в міру зниження температури відбувається стиснення інертного газу.

Під час транспортування зріджених нафтових газів зазвичай застосовують одну з наступних трьох схем заохолодження танків:

Перша схема – заохолодження виконують аналогічно до процесу заохолодження танків на метановозах. Відмінність її від схеми, що застосовується для метановозів, полягає в тому, що газ, що випарувався під час охолодження танків, стискається знову в установці повторного зрідження.

Друга схема – заохолодження здійснюють, використовуючи берегові засоби. Зазвичай цю схему застосовують у тому випадку, коли невелика тривалість рейсу, оскільки зростає час стоянки у терміналу.

Третя схема є комбінацією перших двох. У цій ситуації під час підходу до берега на судні заохолоджують лише частину вантажних танків (наприклад, перший та третій). Під час навантаження в порту заохолоджують інші танки (наприклад, другий та четвертий). Така схема дозволяє приблизно вдвічі зменшити кількість зрідженого газу, що залишається в баластному рейсі для охолодження танків. Також ця схема призводить до зниження енерговитрат на повторне зрідження газу в суднових умовах.

Кількість скрапленого газу, що використовується для заохолодження вантажних танків, в яких транспортуються зріджені нафтові вантажі, під час баластових переходів регламентовано в межах 5 % від усього вантажу, що перевозиться (за масою).

Завантаження скраплених газів можна здійснювати різними способами, проте принципова схема обладнання та функціонування вантажної системи на газовозах однакова. На рис. 3 зображено принципову схему вантажної системи судна-газовоза.

Перед навантаженням необхідно визначити максимально допустиму межу заповнення вантажного танка. Виконати це слід для того, щоб запобігти переповненню. Переповнення може статися, наприклад, за умовою нагрівання танка до температури навколишнього середовища у разі аварії або пожежі, оскільки для зріджених газів характерні значні коефіцієнти термічного розширення [28].

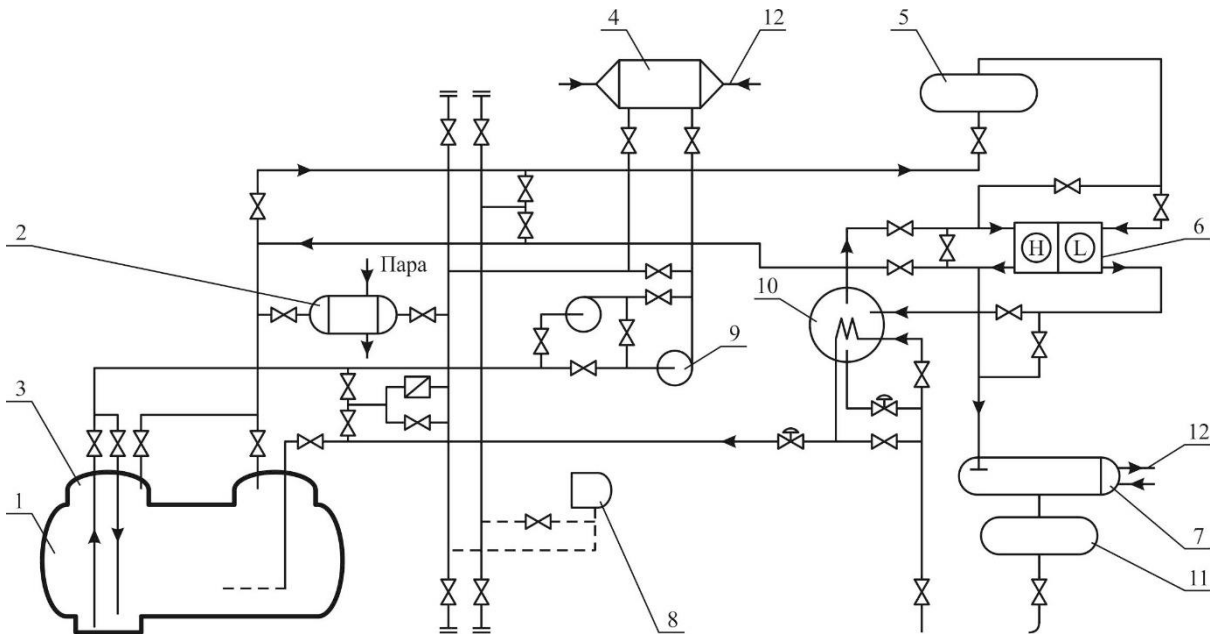


Рисунок 3 – Принципова схема вантажної системи судна-газовозу:

- 1 – вантажний танк; 2 – випарник; 3 – вантажний колектор; 4 – підігрівач;  
 5 – сепаратор; 6 – компресор; 7 – конденсатор; 8 – випускний трубопровід;  
 9 – бустерний насос; 10 – регенеративний теплообмінник; 11 – ресивер;  
 12 – трубопровід заборотної води

Максимальний обсяг заповнення для будь-якого танка розраховують за формулою

$$V_r = 0,98V \frac{d_b}{d_l},$$

де  $V_r$  – граничний обсяг заповнення танка за вказаної температури;

$V$  – загальний обсяг танка;

$d_b$  – густина вантажу при зазначеній температурі;

$d_l$  – густина вантажу при вантажних значеннях температури та тиску.

Для суден, що перевозять гази під тиском без зрідження, зазначена температура визначається як температура, що відповідає тиску пари вантажу за умовою встановленого тиску в запобіжних клапанах. На деяких судах запобіжні клапани встановлені на тиск, що досягає 18...19 бар. Тому температура, що відповідає такому тиску, є максимально допустимою експлуатаційною температурою. Вантажні танки розраховані і сконструйовані саме на такий тиск.

На рефрижераторних судах запобіжні клапани танків встановлюють на відкриття за верхнім значенням тиску парів вантажу при максимальній температурі, що досягається в циклі навантаження, перевезення та розвантаження [29, 30].

На багатьох судах можуть існувати два або три настановні значення тиску в запобіжних клапанах (наприклад, 4 бар 0,3 бар). При цьому зниження значення тиску відкриття досягають шляхом пересування навантажувальної пружини, встановленої над клапаном, що управляє. Нижчий настановний тиск у запобіжних клапанах дозволяє підвищити межі заповнення танка під час навантаження за низьких температур. Однак необхідно розуміти, що за таких умов підвищується ризик несподіваної втрати вантажу в разі порушення температури охолодження вантажу в акваторії гавані.

Рівень рідкого вантажу в танках вимірюють поплавковими індикаторами. Такий індикатор є поплавцем, приєднаним стрічкою до вимірювального пристрою. Покази рівня можна знімати як у місцевому, також і на дистанційному пульті. Поплавці пересуваються разом із рівнем рідини в танку. Якщо поплавковий індикатор рівня виходить з ладу, перебуваючи в танку в самому нижньому положенні, при цьому відсутня можливість відремонтувати його негайно, рівень рідкого вантажу можна визначити приблизно за допомогою укріплених стаціонарних труб.

Різниця між температурою вхідного вантажу і температурою стінок танка повинна бути мінімальною, щоб не сприяти виникненню підвищеної термічної напруги під час навантаження. Тому танки мають бути охолоджені знизу. Нижнє охолодження танків досягається за рахунок введення рідкого вантажу через магістраль, що впорскує та нижню охолоджувальну лінію, за умовою малої та ретельно контрольованої швидкості її подачі. Якщо тиск досягає небажаних підвищених значень, пари вантажу слід повернути на берег або зробити їх скраплення, використовуючи суднові компресори.

Основні особливостей процесів завантаження залежать від способів навантаження та передбачають наступне.

У разі навантаження із поверненням пари вантажу. Цей спосіб навантаження, при якому відбувається повернення парів вантажу на термінал, зазвичай використовують у випадках, коли вантажі токсичні. Також його застосовують, якщо навантаження відбувається в інертизованих танках на судах, на яких не можуть працювати суднові системи зрідження, за умови, що випуск газів у навколишню атмосферу неприпустимий. Завантаження цим способом досить просте, якщо зворотна лінія функціонує як парова з надлишковим тиском. Азот, що використовується за цих умов з метою інертизації, або спалюють у газовому полум'ї берегової установки, або повертають у танки.

У разі навантаження без повернення парів вантажу. Під час використанні цього способу швидкість навантаження регулюється в залежності від продуктивності суднової установки для зрідження газів. Відповідно навантаження проводять за умовою дуже малої швидкості (особливо в тих випадках, коли вантажі надходять з високим тиском та високої температурі). Завантаження, яке виконується за цим способом, може також затримувати присутність неконденсованих газів (таких як повітря, інертний газ або азот). Виходячи з цього, щоб запобігти підвищенню тиску, перелічені гази видаляють із конденсатора. На більшості суден застосовують спеціальні діаграми, що враховують співвідношення між швидкістю навантаження та температурою вантажу. Подібні діаграми розраховані на більшість найбільш поширених вантажів.

У разі навантаження з іншого судна. Здійснення навантаження з іншого судна або вантажного танка будь-якого іншого транспортного засобу, без насосів і компресорів, вимагає застосування спеціальної технології. Вантаж повинен бути за температурою навколишнього середовища та, відповідно, за при підвищеним тиском. Тиск вантажу на іншому судні (або в вантажній ємності іншого транспортного засобу) має бути вищим, ніж тиск вантажу на судні. При цьому на початку навантаження вантаж буде переміщатися самопливом, під дією власного тиску. Однак тиск у вантажному танку судна, в який здійснюється навантаження, швидко збільшуватиметься. Тому потрібно використовувати зріджувальну (рефрижераторну) систему – для того, щоб зменшувати тиск вантажу, що надходить у судновий танк. Це сприятиме збереженню природного руху вантажу самопливом із судна-постачальника у вантажні танки судна. Пари вантажу, що виходять з вантажних танків, або зріджують і повертають у суднові вантажні танки, або направляють у «гарячому» вигляді до вантажних танків судна-постачальника, в яких підтримується високий тиск.

У разі навантаження хімічних продуктів. Навантаження хімічних продуктів зазвичай проводять за температурою доквілля, оскільки тиск, за яким знаходяться хімічні продукти, зазвичай нижче атмосферного. Зазвичай хімічні продукти завантажують у танки, які заповнені інертним газом чи азотом. Протягом рейсу виникає необхідність підвищення тиску усунення вакууму в танках (із застосуванням азоту). Охолодження хімічних продуктів можливе тільки за

умовою використання безпосередньо системи охолодження або системи зрідження. Для перевезення хімічних продуктів постачальники та перевізники розробляють додаткові вимоги.

На всіх рефрижераторних та напіврефрижераторних газозовах у процесі навантаження необхідно ретельно контролювати температуру та тиск вантажу. На танкерах для перевезення скраплених нафтових газів контроль температури та тиску здійснюють шляхом зрідження википаючих парів газу та поверненням їх у вантажні танки. Можливі випадки, коли під час навантаження потрібно зменшувати температуру зрідженого газу-вантаж, щоб зменшити кількість вогнебезпечних газів, що виходять під час вивантаження. Виникає така ситуація внаслідок того, що температура вантажу у вантажних танках виявляється нижчою, ніж його температура у берегових танках. Залежно від типу вантажу та продуктивності рефрижераторної установки, а в деяких випадках і погодних умов, іноді для охолодження вантажу може знадобитися кілька днів.

Не рекомендується запускати компресор у важких погодних умовах (під час хвилювання моря або штормових умов), щоб запобігти потраплянню в компресор рідини. Така небезпека існує незалежно від того, що більшість рефрижераторних установок обладнано запобіжними клапанами на всмоктування. Вентилувати компресор необхідно протягом часу, який буде потрібно для зменшення тиску і температури, а також для випаровування рідини, що не стискається.

Якщо рефрижераторна установка працює безперервно, обслуговуючи більше одного вантажного танка, необхідно ретельно контролювати кількість конденсату, що повертається, щоб уникнути переповнення установки.

Під час завантаження необхідно здійснювати постійний контроль якості та надійності роботи вантажного обладнання; при цьому не слід допускати витоків в азотну або повітряну магістраль.

На газозовах для перевезення зріджених природних газів може знадобитися індивідуальний візуальний контроль зовнішнього обладнання вантажного танка, якщо несправний температурний датчик, розташований усередині танка. Такі заходи контролю необхідно виконувати з дотриманням усіх правил безпеки під час входу до обмежених просторів, а також з урахуванням вимог щодо контролю атмосфери суміжних просторів.

**Висновки.** Як результат виконаних досліджень зробимо наступні висновки.

Транспортування вогнебезпечних вантажів суднами-газовозами неможливо без виконання спеціальних технологічних операцій з підготовки судових вантажних танків (до прийняття вантажу, а також після його вивантаження), зміни технічного стану вантажу (з газоподібного до рідкого під час завантаження та з рідкого до газоподібного під час вивантаження), безперервного контролю технічного стану вантажних танків під час морських та океанських переходів, а також постійного контролю стану вантажу.

Особливостями процесу транспортування скраплених вантажів є також необхідність виконання процесів інертизації та дегазації вантажних танків, а також контролю рівню кисню в вантажних танках.

Всі технологічні операції з приймання, перевезення та видачі скраплених газів як вантажу, що перевозяться суднами-газовозами повинні виконуватися з суворим виконанням умов, що забезпечують їх безпеку, а також з урахуванням вимог постачальників та замовників цих вантажів.

## ЛІТЕРАТУРА

1. Сагін С.В., Сагін С.С. Визначення методу управління рухом суден морського транспорту під час забезпечення їх безпечного розходження // Водний транспорт. Збірник наукових праць. – 2023. – Вип. 2(38). – С. 187-198. doi.org/10.33298/2226-8553/2023.2.38.20.

2. Головань А.І. Концептуальна модель планування та оптимізації графіків технічного обслуговування вантажних суден. // Водний транспорт. Збірник наукових праць. – 2023. – Вип. 1(37). – С. 107-115. doi.org/10.33298/2226-8553.2023.1.37.12.
3. 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.
4. Бурмака И.А., Ворохобин И.И., Федоров Д.Б. Учет динамики судов при автоматическом выборе маневра расхождения уклонением одного судна и пассивным торможением другого // Судноводіння : науково-технічний збірник. – 2021. – Вип. 31. –С. 80-88. DOI: 10.31653/2306-5761.31.2021.80-88.
5. 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>.
6. 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 & Technology. – 2022.– Vol.69. – Iss.1. – P. 53-61. DOI 10.17818/NM/2022/1.7.
7. Sagin S., Kuropyatnyk O., Sagin A., Tkachenko I., Fomin O., Píšťek V., Kučera P. Ensuring the Environmental Friendliness of Drillships during Their Operation in Special Ecological Regions of Northern Europe. J. Mar. Sci. Eng. 2022, 10(9), 1331. <https://doi.org/10.3390/jmse10091331>.
8. Тимошук О.М., Боріна М.В. Дослідження методів підвищення екологічності суднових енергетичних установок у водному середовищі // Водний транспорт. Збірник наукових праць. – 2022. – Вип. 2(36). – С. 240-252. doi.org/10.33298/2226-8553.2022.2.36.21.
9. Куропятник А. А., Сагин С.В. Управление выпускными газами судовых дизелей для обеспечения экологических показателей // Автоматизация судовых технических средств : науч.-техн. сборник, 2018. – Вып. 24. – С. 72-80.
10. Sagin S.V., Karianskyi S., Sagin S.S., Volkov O., Zablotskyi Y., Fomin O., Píšťek V., Kučera P. Ensuring the safety of maritime transportation of drilling fluids by platform supply-class vessel // Applied Ocean Research, 2023. – Vol. 140. 103745. <https://doi.org/10.1016/j.apor.2023.103745>.
11. Sagin S.V., Sagin S.S., Fomin O., Gaichenia O., Zablotskyi Y., Píšťek V., Kučera 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>.
12. Burmaka I., Vorokhobin I., Melnyk O., Burmaka O., Sagin S. Method of Prompt Evasive Manuever Selection to Alter Ship's Course or Speed // Transactions on Maritime Science. – 2022. – Vol. 11(1). – P. 1-9. <https://doi.org/10.7225/toms.v11.n01.w01>.
13. Даки О.А., Пліта Л.Л., Трофименко І.В., Федунів В.М. Особливості та вимоги щодо навігаційного забезпечення безпеки судноводіння на внутрішніх судноплавних шляхах // Водний транспорт. Збірник наукових праць. – 2022. – Вип. 2(36). – С. 184-194. doi.org/10.33298/2226-8553.2022.2.36.15.
14. Левченко О.В. Синтез варіантів дій судноводія у небезпечних ситуаціях з урахуванням часових та ресурсних обмежень у суднових СППР. // Водний транспорт: Збірник наукових праць. – 2021. – Вип. 3(34). – С. 89-98. doi.org/10.33298/2226-8553/2021.3.34.10.
15. Сагін С.В., Сагін С.С. Використання штучного інтелекту в ситуаціях надмірного зближення суден // Водний транспорт. Збірник наукових праць. – 2024. – Вип. 1(39). – С. 215-225. doi.org/10.33298/2226-8553.2024.1.39.22.
16. Гончарук І.П., Никифоров Ю.О., Кошарська Л.В., Головань А.І. Особливості впливу відновлюваної енергетики на ефективність і екологічність морського транспорту. // Водний транспорт. Збірник наукових праць. – 2023. – Вип. 2(38). – С. 73-80. doi.org/10.33298/2226-8553.2023.2.38.08.
17. Тимошук О.М., Даки 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>.

18. Тимошук О.М., Мельник О.В. Аналіз можливості використання маневру розходження зміною курсу // Водний транспорт. Збірник наукових праць. – 2023. – Вип. 1(37). – С. 96-102. doi.org/10.33298/2226-8553.2023.1.37.10.
19. Sagin S., Madey V., Sagin, A., Stoliaryk T., Fomin O., Kučera P. Ensuring Reliable and Safe Operation of Trunk Diesel Engines of Marine Transport Vessels. J. Mar. Sci. Eng. 2022, 10(10), 1373. https://doi.org/10.3390/jmse10101373.
20. Сагин С.В., Заблоцкий Ю.В., Перунов Р.В. Технология использования и результаты испытаний присадок к топливам для судовых дизелей // Проблемы техники: наук.-виробн. журнал. – 2012. – № 3. – Одесса: ОНМУ. – С. 84-103.
21. Sagin S.V. Determination of the optimal recovery time of the rheological characteristics of marine diesel engine lubricating oils // Materials of the International Conference “Process Management and Scientific Developments” (Birmingham, United Kingdom, January 16, 2020. Part 4). – P. 195-202. DOI. 10.34660/INF.2020.4.52991.
22. Поповский А.Ю., Сагин С.В. Комплексная оценка эксплуатационных характеристик смазочных углеводородных жидкостей // Автоматизация судовых технических средств : науч.-техн. сборник. – 2014. – Вып. 20. – С. 74-83.
23. Сагин С.В. Повышение надежности работы прецизионных пар топливной аппаратуры судовых дизелей за счет использования органических покрытий // Вісник Одеськ. нац. мор. ун-ту. – 2018. – Вип. 4(57). – С. 109-120.
24. 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. 89-101.
25. Поповский А.Ю., Сагин С.В. Оценка эксплуатационных свойств смазочно-охлаждающих жидкостей судовых технических средств // Автоматизация судовых технических средств: науч.-техн. сборник. – 2016. – Вып. 22. – С. 66-74.
26. Сагин С.В. Зниження енергетичних втрат в прецизійних парах паливної апаратури суднових дизелів // Суднові енергетичні установки : наук.-техн. зб. – 2018. – Вип. 38. – С. 132-142.
27. Мацкевич Д.В., Сагин 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. – С.109-118.
28. Дакі О.А., Якусевич Ю.Г., Тришин В.В., Дороф'єєва З.Я. Розроблення пропозицій щодо декомпозиції суднової холодильної установки та математичної моделі компресора. // Водний транспорт. Збірник наукових праць. – 2023. – Вип. 1(37). – С. 194-200. doi.org/10.33298/2226-8553.2023.1.37.22.
29. Дакі О.А., Якусевич Ю.Г., Колесник В.В., Тришин В.В. Методика обґрунтування моделі для аналізу роботи двоступінчастої суднової холодильної установки в нестационарних режимах. // Водний транспорт – 2023. – Вип. 1(37). – С. 188-193. doi.org/10.33298/2226-8553.2023.1.37.21.
30. Дакі О.А., Якусевич Ю.Г., Ліганенко В.В., Тришин В.В. Модель системи кондиціонування та охолодження повітря на сучасних нафтоналивних суднах і газозах. // Водний транспорт: Збірник наукових праць. – 2022. – Вип. 1(35). – С. 121-127. doi.org/10.33298/2226-8553.2022.1.35.15.

#### REFERENCES

1. Sagin S.V., Sagin S.S., Determination of the method of controlling the movement of marine transport vessels while ensuring their safe divergences // Water transport. – 2023. – № 2(38). – С. 187-198. doi.org/10.33298/2226-8553/2023.2.38.20.
2. Golovan A.I. Conceptual model of planning and optimization of cargo vessel maintenance schedules. // Water transport. – 2023. – № 1(37). – P. 107-115. doi.org/10.33298/2226-8553.2023.1.37.12.

3. Sagin S., Kuropyatnyk O., Tkachenko I. Ensuring the environmental friendliness of marine diesel engines of specialized ships // *Ship power plants*. – 2022. – Vol. 45. – P. 5-16. doi: 10.31653/smf45.2022.5-16.
4. Burmaka I., Vorokhobin I., Fedorov D. Account dynamics of ships at the automatic choice of manoeuvre of divergence by deviation of one ship and by the passive braking of the other // *Shipping & Navigation: Research journal*. – 2021. – Vol. 31. – P.80-88. doi.org/10.31653/2306-5761.31.2021.80-88.
5. 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>.
6. 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 & Technology*. – 2022.– Vol. 69. – Iss.1. – P. 53-61. DOI 10.17818/NM/2022/1.7.
7. Sagin S., Kuropyatnyk O., Sagin A., Tkachenko I., Fomin O., Píšťek V., Kučera P. Ensuring the Environmental Friendliness of Drillships during Their Operation in Special Ecological Regions of Northern Europe // *J. Mar. Sci. Eng.* – 2022. – Vol. 10(9). – P. 1331. <https://doi.org/10.3390/jmse10091331>.
8. Tymoshchuk O., Borina M. Research of methods of enhancing the environmental facility of ship power plants in the aquatic environment // *Water transport*. – 2022. – № 2(36). – P. 240-252. doi.org/10.33298/2226-8553.2022.2.36.21.
9. Kuropyatnyk O.O., Sagin S.V. Controlling the exhaust gases of marine diesel engines to ensure environmental performance // *Automation of ship technical facilities*. –2018. – № 24. – P. 72-80.
10. Sagin S.V., Karianskyi S., Sagin S.S., Volkov O., Zablotskyi Y., Fomin O., Píšťek V., Kučera P. Ensuring the safety of maritime transportation of drilling fluids by platform supply-class vessel // *Applied Ocean Research*, 2023. – Vol. 140. 103745. <https://doi.org/10.1016/j.apor.2023.103745>.
11. Sagin S.V., Sagin S.S., Fomin O., Gaichenia O., Zablotskyi Y., Píšťek V., Kučera 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>.
12. Burmaka I., Vorokhobin I., Melnyk O., Burmaka O., Sagin S. Method of Prompt Evasive Manuever Selection to Alter Ship's Course or Speed // *Transactions on Maritime Science*. – 2022. – Vol. 11(1). – P. 1-9. <https://doi.org/10.7225/toms.v11.n01.w01>.
13. Daki O.A., Plita L.L., Trofymenko I.V., Fedunov V.M. Feature and requirements for navigational safety of navigation on inland waterways // *Water transport*. – 2022. – № 2(36). – P. 184-194. doi.org/10.33298/2226-8553.2022.2.36.15.
14. Levchenko O. Synthesis of vessels' options in dangerous situations taking into account time and resource restrictions in vessel DSS. // *Water transport*. – 2021. – № 3(34). – P. 89-98. doi.org/10.33298/2226-8553/2021.3.34.10.
15. Sagin S.S., Sagin S.V., Use of artificial intelligence in the situations of excessive vessel // *Water transport*. – 2024. – № 1(39). – P. 215-225. doi.org/10.33298/2226-8553.2024.1.39.22.
16. Honcharuk I.P., Nykyforov Yu.O., Kosharska L.B., Golovan A.I. Features of the influence of renewable energy on the efficiency and environmental safety of maritime transport. // *Water transport*. – 2023. – № 2(38). – P. 73-80. doi.org/10.33298/2226-8553.2023.2.38.08.
17. Tymoshchuk O., Daki O., Boyko O., Karadobriy T. Analytical Inspection of adaptive vessel control systems and ways of their construction // *Water Transport: Collection of scientific works*. – 2020. – № 3(31). – P. 120-125. doi.org/10.33298/2226-8553/2020.3.31.13.
18. Tymoshchuk O., Melnyk O. Analysis of the possibility of using the divergence maneuver by changing the course // *Water Transport: Collection of scientific works*. – 2023 – № 1(37). – P.96-102. doi.org/10.33298/2226-8553.2023.1.37.10.
19. Sagin S., Madey V., Sagin,A., Stoliaryk T., Fomin O., Kučera P. Ensuring Reliable and Safe Operation of Trunk Diesel Engines of Marine Transport Vessels // *J. Mar. Sci. Eng.* –2022. – Vol. 10(10). – P. 1373. <https://doi.org/10.3390/jmse10101373>.

20. Sagin S.V., Zablotsky Yu. V., Perunov R.V. Technology of use and test results of fuel additives for marine diesel engines // Problems of technical. – 2012. – Vol. 3. – P. 84-103.
21. Sagin S.V. Determination of the optimal recovery time of the rheological characteristics of marine diesel engine lubricating oils // Materials of the International Conference “Process Management and Scientific Developments” (Birmingham, United Kingdom, January 16, 2020. Part 4). – P. 195-202. DOI. 10.34660/INF.2020.4.52991.
22. Popovskii A.Y., Sagin S.V. Complex assessment of operational characteristics of lubricating hydrocarbon liquids // Automation of ship facilities. – 2014. – №20. – P. 74-83.
23. Sagin S.V. Increasing the reliability of precision pairs of marine diesel fuel equipment through the use of organic coatings // Herald of the Odessa National Maritime University. – 2018. – Vol. 4(57). – P. 109-120.
24. 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. – Vol. 1(58). – P. 89-100.
25. Popovskii A.Y., Sagin S.V. Evaluation of operational properties of lubricating and cooling liquids of marine technical equipment // Automation of ship technical facilities. – 2016. – Vol. 22. – P. 66-74.
26. Sagin S.V. Reduction of energy losses in precision steam fuel equipment of marine diesel engines // Ship power plants. – 2018. – Vol. 38. – P. 132-142.
27. 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. – Vol. 25. – P. 109-118.
28. Daki O.A., Yakusevych Yu.H., Tryshyn V.V., Dorofieieva Z.Ia. Development of proposals for the decomposition of the ship refrigeration unit and the compressor mathematical model. // Water transport. – 2023. – № 1(37). – P. 194-200. doi.org/10.33298/2226-8553.2023.1.37.22.
29. Daki O.A., Yakusevych Yu.H., Kolesnyk V.V., Tryshyn V.V. Methodology of model substantiation for analysis of operation of a two-stage ship refrigeration unit in non-stationary modes. // Water transport. – 2023. – № 1(37). – P. 188-193. doi.org/10.33298/2226-8553.2023.1.37.21.
30. Daki O.A., Yakusevych Yu.H., Lihanenko V.V., Tryshyn V.V. Model of air conditioning and cooling system on modern oil-filling ships and gas carriers. // Water transport. – 2022. – № 1(35). – P. 121-127. doi.org/10.33298/2226-8553.2022.1.35.15.

*Sagin S.V., Mateiko O.V.*

## **PECULIARITIES OF INERTIZATION OF CARGO TANKS OF GAS CARRIERS DURING TRANSPORTATION OF FLAMMABLE SUBSTANCES**

The peculiarities of processing cargo tanks of gas carriers during the transportation of flammable substances are considered. It was determined that the most reliable way to prevent fires and explosions in cargo tanks is their inertization. Methods of inerting cargo tanks of gas carriers are given. The analysis of the main technological operations directly related to the process of transporting flammable substances, namely inerting, degassing, vacuuming, was performed. Charts are provided for determining explosive concentrations of mixtures of various cargoes with oxygen. An analysis of the main features of the following loading methods was performed: loading with return of cargo vapors, loading without return of cargo vapors, loading from another ship, loading of chemical products. It was determined that all technological operations for the reception, transportation and delivery of liquefied gases as cargo transported by gas carriers must be performed with strict compliance with the conditions that ensure their safety, as well as taking into account the requirements of suppliers and customers of these cargoes.

**Key words:** vacuuming of cargo tanks, degassing of cargo tanks, inertization of cargo tanks, inert gas, sea transport, gas carriers, transportation of liquefied gases.