

10.31653/smf47.2023.148-156

Сагін С.В., Матеїко О.В.

Національний університет «Одеська морська академія»

АНАЛІЗ СПОСОБІВ ІНЕРТИЗАЦІЇ ВАНТАЖНИХ ТАНКІВ СУДЕН-ГАЗОВОЗІВ

Постановка проблеми в загальному вигляді. В теперішній час кількість суден, що здійснюють перевезення зрідженого газу постійно зростає. Це пов'язано з енергетичною залежністю ряду країн (насамперед Європи, Канади, Китаю та Японії) та неможливістю постачання до них газового палива континентальними трубопроводами. Виробнича послідовність отримання вантажу (зрідженого газу) в порту завантаження – транспортування вантажу морськими чи океанськими шляхами – вивантаження вантажу в порту доставки, завершується обов'язковою технологічною операцією з зачистки танків і вільних порожніх просторів. Як правило, вона виконується за схемою інертизація – дегазація – повторна інертизація – очищення. В зв'язку з тим, що після вивантаження судна-газовози здійснюють зворотні переходи в баласті, якість проведення операцій з зачистки танків після вивантаження набуває вкрай важливе значення, через те, що саме від її виконання залежить вибухобезпечність вантажних танків та, отже, безпека судна, суднового екіпажу та довкілля [1-3].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Інертизація вантажних танків суден, що перевозять рідкі нафтові або зріджені газові вантажі, забезпечує зниження вмісту кисню в цих танках до рівню, що гарантує неможливість будь-якого займання безпосередньо вантажу, залишків пари вантажу, або суміші газів, що знаходиться в танку. Як інертний газ використовуються випускні газі судових дизелів та судових парових котлів (при цьому остаточний вміст кисню в випускних газах саме парових котлів значно менший, ніж в випускних газах дизелів), але обсягу цих газів не завжди вистачає для повного заповнення всіх вантажних танків. Тому найбільш поширеним джерелом інертних газів на судах є спеціальні генератори інертних газів. Те, який газ можливо використовувати для інертизації вантажних танків визначається вимогами фрахтувальника щодо мінімального вмісту кисню в атмосфері танку, точки роси, сумісністю вантажу та інертного газу та іншими другорядними характеристиками [4, 5].

Перевезення вантажів, що вступають у реакцію з вуглекислим газом CO_2 або іншими компонентами інертного газу, який генерується судновою системою інертних газів, або якщо ці вантажі вимагають дуже низького вмісту кисню, є причиною використання для забезпечення інертизації азоту. Азот є хімічно неактивним (інертним) газом. У хімічні реакції з деякими елементами він може вступати тільки за високих тисків і температур у присутності каталізатора. Тому в нормальних умовах азот не вступає в реакцію з вантажами, що перевозяться суднами-газовозами. Азот можливо отримувати за допомогою спеціальної суднової установки, що відділяє його з повітря, або з берегових станцій постачання. Азот, одержуваний у промислових цілях, містить у своєму складі не більше 0,0005 % кисню, що є безумовною гарантією неможливості будь-якого займання в вантажних танках. За своєю якістю та складом інертні газі, що генеруються судновою системою, значно поступаються азоту. В зв'язку з тим, що в судових умовах інертні газі отримують спалюванням палива у спеціальній установці, то в їх складі завжди присутні механічні домішки, сажа, пари води, вуглекислий газ, а також продукти згоряння палива. Вміст кисню в інертних газах, що генеруються судновою системою в залежності від її характеристик знаходиться в діапазоні від 0,1 % до 5 % за обсягом. Цього рівню, безумовно, також вистачає для безпеки суден-газовозів, але запас надійності цієї безпеки, значно менший ніж під час інертизації вантажних танків азотом [6, 7].

Оптимізація процесу інертизації вантажних танків нафтових танкерів та суден-газовозів вивчалась багатьма дослідниками. При цьому були запропоновані рішення, що забезпечують зміну способу заповнення танків, збільшення продуктивності суднової системи інертних газів, зміни термодинамічних характеристик та хімічних складових інертних газів [8, 9]. При цьому питання визначення оптимальних способів інертизації вантажних танків шляхом їх заповнення азотом, залишаються вирішеними не в повній мірі.

Постановка завдання. Як завдання дослідження був аналіз судових схем, що забезпечують процес інертизації вантажних танків суден-газовозів.

Виклад основного матеріалу дослідження. Технологічні схеми, що забезпечують інертизацію вантажних танків, залежать від конструкційних особливостей суден-газовозів. До основних з них відносяться каскадна, напівкаскадна та паралельна [10].

Інертизація (продування) каскадом означає, що танки продуваються один за одним, атмосфера одного танка витісняється в інший танк і таким чином виконується заповнення всіх танків (рис. 1).

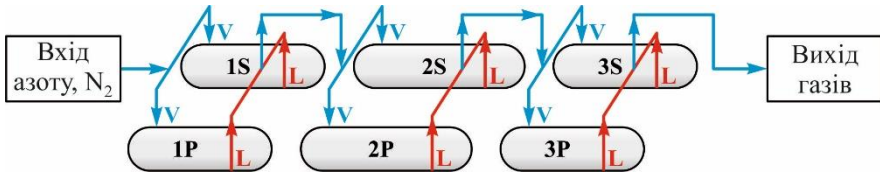


Рис. 1. Принципова схема, що забезпечує продування танків каскадом:
S – правий борт (Startboard); P – лівий борт (Port Side);
L – лінія рідини (Liquid line); V – лінія пари (Vapor line)

Під час продування каскадом азот подається у верхню частину танка, а потім відводиться з нижньої частини цього танка у верхню частину другого танка і далі. Така процедура дозволяє значно заощадити загальну кількість азоту, необхідну для повного продування всіх вантажних танків.

Дуже часто вантажна система судна не дозволяє з'єднати усі танки послідовно. У такому випадку можна використовувати так званий напівкаскадний метод продування. Зазвичай, вантажна система газозова розділена на дві окремі групи, що дозволяє проводити продування каскадом однієї групи танків послідовно, а другої групи в паралель (рис. 2).

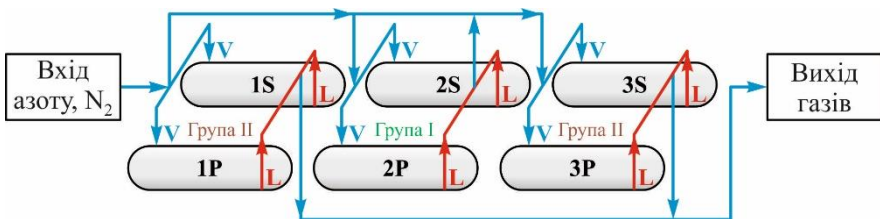


Рис. 2. Принципова схема, що забезпечує продування танків напівкаскадом:
S – правий борт (Startboard); P – лівий борт (Port Side);
L – лінія рідини (Liquid line); V – лінія пари (Vapor line)

На схемі, що надана на рис. 2, одна перша система містить танки 2 лівого та 2 правого борту (2S та 2P) в одній групі, друга система – а танки 1 лівого та 1 правого борту (1S та 1P), а також танки 3 лівого та 3 правого борту (3S та 3P). Групи включені у систему паралельно, але танки другої групи продуваються каскадом.

За тимчасовим показником така схема продування працює досить добре, оскільки можна значно збільшити швидкість азоту, що подається, але витрата азоту в цьому випадку також значно підвищується.

Якщо немає можливості з'єднати танки послідовно, тоді продування виконується паралельно, при цьому схема набуває вигляду, представленого на рис. 3.

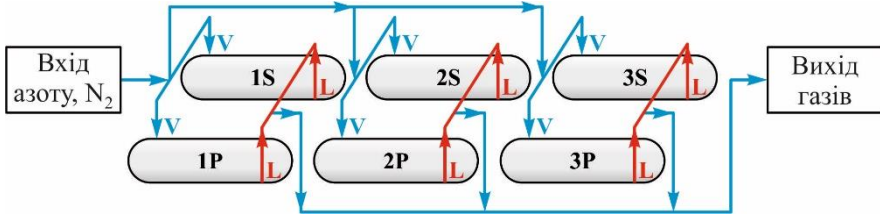


Рис. 3. Принципова схема, що забезпечує продування танків у паралель:
S – правий борт (Startboard); P – лівий борт (Port Side);
L – лінія рідини (Liquid line); V – лінія пари (Vapor line)

У цьому випадку азот подається одночасно до всіх танків по загальній газовій магістралі, відведення атмосфери танку на вентиляційну колону або до берегової системи газовідведення здійснюється по загальній магістралі також одночасно з усіх танків. Основний недолік такого способу – значна витрата азоту на продування танків, однак, висока швидкість подачі азоту в танки дозволяє зменшити загальний час продування танків.

Азот також може використовуватися з метою розведення атмосфери вантажного танку. В цьому випадку подача азоту в танк проводиться з високою швидкістю, що сприяє рівномірному перемішуванню (розведенню) атмосфери танку з азотом (рис. 4).

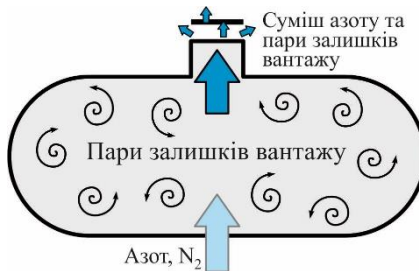


Рис. 4. Метод розведення атмосфери танка азотом

Під час зміни атмосфери танка методом розведення дотримуються наступних практичних рекомендацій:

- азот повинен надходити в танк із температурою $+50^{\circ}\text{C} \dots +70^{\circ}\text{C}$;
- важчий газ завжди повинен надходити в танк зверху, легкий газ слід подавати донизу танку;
- продування слід починати з максимальною подачею азоту для забезпечення кращого перемішування атмосфери танка [11, 12].

Основне завдання під час використання цього методу – забезпечити якомога повніше перемішування атмосфери танка з азотом. Це досягається досить легко подачею азоту в нижню частину танків із високою швидкістю. Відведення суміші здійснюється з верхньої частини танка по газовій магістралі.

Такий спосіб застосовується лише тоді, коли скорочення часу стоянки судна в порту домінує над витратами на азот [13].

Продування вантажних танків також можливо шляхом використання пари вантажу, що є досить легкою операцією. Більшість парів, вантажів, що перевозяться, значно важчі азоту (виключаючи аміак і етилен). Тому, виглядає очевидним, подавати важкі пари вантажу на низ танка. Для суден середньої вантажомісткості (до 15000 м^3) продування парами вантажу доцільніше проводити в паралель (рис. 5), тому що для продування судна такої місткості, використання каскадної схеми продування призведе до значних тимчасових втрат, тому що після продування систему необхідно буде налаштувати на паралельне навантаження.

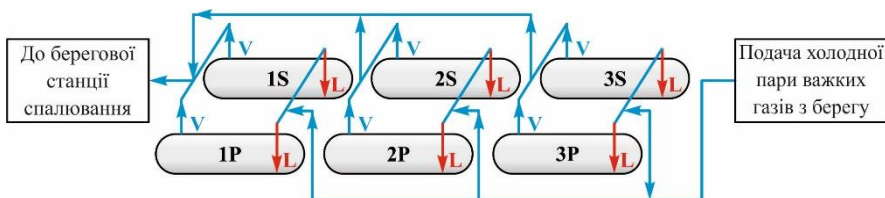


Рис. 5. Принципова схема, що забезпечує продування танків у паралель холодною парою важких вантажів:

S – правий борт (Starboard); P – лівий борт (Port Side);

L – лінія рідини (Liquid line); V – лінія пари (Vapor line)

Продування в паралель також дозволяє, при значній інтенсивності подачі парів у танки, утримувати мінімальний тиск усередині тан-

ків, чим досягається найбільш повне використання ефекту витиснення [14].

Під час продування танків парами легких газів використовують схему, що наведена на рис. 6.

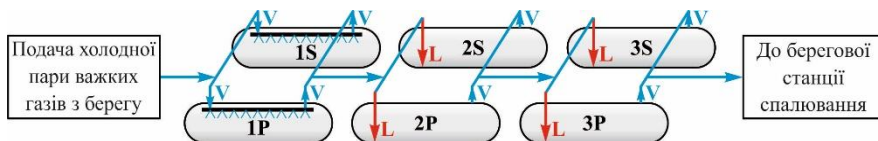


Рис. 6. Принципова схема, що забезпечує продування танків каскадом холодною парою легких вантажів:

S – правий борт (Startboard); P – лівий борт (Port Side);
L – лінія рідини (Liquid line); V – лінія пари (Vapor line)

Найбільш поширені під час використання цього способу є етилен та аміак. Пари етилену мають приблизно таку ж густину, що й пари азоту. Тому продування танків парами етилену вимагає набагато більшої кількості вантажу, ніж продування парами зрідженого газу. Якщо подача етилену з берега здійснюється в вигляді пари, то використовується береговий компресор. У цьому випадку більшість парів, що відводяться з судна до берегового газовідведення, зріджується повторно. Так як в цьому випадку існує можливість підігріти пари етилену перед їх подачею на судно, то також густина парів може бути дещо нижчою, ніж густина холоднішого азоту у вантажних танках. У цьому випадку продування здійснюється каскадом за схемою «зверху вниз» [15, 16].

Цей метод можна оптимізувати, коли концентрація парів етилену у першому танку досягне 100 %. Після цього можна починати подачу етилену в зрідженому вигляді на верхній розпил танка. Інтенсивність подачі рідкого етилену повинна бути незначною, щоб забезпечити повне випаровування вантажу всередині танка та його поступове охолодження. В цей же час система повинна бути перебудована таким чином, щоб холодні пари етилену подавалися за схемою «знизу вгору». Після досягнення 100 %-ної концентрації парів етилену в наступному танку, також починається подача рідкого вантажу на верхній розпил цього танка і проводиться його охолодження (рис. 5).

Оскільки продування танків парами здійснюється одночасно з їх охолодженням, така операція дозволяє значно заощадити час. Якщо берегової термінал може подавати в суднову систему тільки рідкий

вантаж, то для отримання гарячої пари можна використовувати палубний підігрівач [17].

Продування танків парами зрідженого газу зазвичай проводиться у суднових умовах з використанням вантажу з дек-танку. Цей вантаж називається охолодний агент (рис. 7).

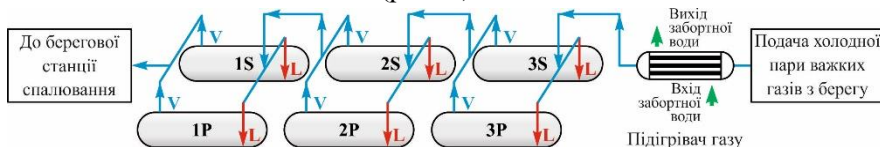


Рис. 7. Продування танків каскадом з використанням гарячої пари рідкого вантажу:

S – правий борт (Startboard); P – лівий борт (Port Side);
L – лінія рідини (Liquid line); V – лінія пари (Vapor line)

У процесі використання охолоджуючого агента для продування та охолодження інших танків можуть бути використані або суднові компресора, або танк з вантажем може бути використаний як випарник. Для цього вантажним насосом рідкий вантаж подається на верхній розпил танка, а пари, що утворюються при цьому, перепускаються по каскадній системі в інші танки за схемою «знизу вгору».

Висновки і перспективи подальших досліджень. Наведені результати дозволяють зробити наступні висновки.

Постійно зростаючий попит на газове паливо та обмеження деяких країн в отриманні подібного палива континентальними газопроводами сприяє транспортуванню зріджених газів морськими та океанськими шляхами суднами-газовозами. Навігаційні переходи цих суден (як з вантажем, а також в баласті) неможливі без інертизації вантажних танків, основним завданням якого є зменшення концентрації кисню в атмосфері танку до рівня, за яким неможливе займання пари газів, що в них знаходяться.

Інертизація вантажних танків може бути забезпечена шляхом використання інертних газів. При цьому можливе виробництво інертних газів в спеціальних генераторах, що встановлюються на судах, а також використання азоту, який може бути отриманий або з берегових станцій, або згенерований на судні.

В залежності від конструкційних характеристик судна-газовоза інертизація його танків азотом виконується за наступними схемами: каскадною, напівкаскадною, паралельною. Також можлива технологія, що забезпечує розведення атмосфери вантажного танку азотом.

До методів, що забезпечують інертизацію вантажних танків також відносяться використання холодної та гарячої пари легких або важких вантажів.

Перелік використаних джерел

1. Sagin S.V., Kuropyatnyk O.A. The Use of Exhaust Gas Recirculation for Ensuring the Environmental Performance of Marine Diesel Engines // *Nase More : International Journal of Maritime Science and Technology*. – 2018. – Vol. 65(2). – P. 78-86. doi.org/10.17818/NM/2018/2.3.

2. Kuropyatnyk O.A., Sagin S.V. Exhaust Gas Recirculation as a Major Technique Designed to Reduce NOx Emissions from Marine Diesel Engines // *Nase More : International Journal of Maritime Science and Technology*. – 2019. – Vol. 66(1). – P. 1-9. <https://doi.org/10.17818/NM/2019/1.1>.

3. 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 // *Journal of Marine Science and Engineering*. – 2022. – Vol. 10(10). – 1373. <https://doi.org/10.3390/jmse10101373>.

4. 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>.

5. 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.

6. 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>.

7. 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>.

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

9. Sagin S., Karianskyi S., Madey V., Sagin A., Stoliaryk T., Tkachenko I. Impact of Biofuel on the Environmental and Economic Performance of Marine Diesel Engines // *Journal of Marine Science and En-*

gineering. – 2023. – Vol. 11(1). – 120.
<https://doi.org/10.3390/jmse11010120>.

10. Peruško D., Karabai'c D., Bajsi'c I., Kutin J. Ageing of Liquefied Natural Gas during Marine Transportation and Assessment of the Boil-Off Thermodynamic Properties // Journal of Marine Science and Engineering. – 2023. – Vol. 11. – P. 1980. <https://doi.org/10.3390/jmse110101980>.

11. 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.

12. Sagin S., Kuropyatnyk O., Sagin A., Tkachenko I., Fomin O., Pištěk V., Kučera P. Ensuring the Environmental Friendliness of Drillships during Their Operation in Special Ecological Regions of Northern Europe. Journal of Marine Science and Engineering. – 2022. – Vol. 10(9). – 1331. <https://doi.org/10.3390/jmse10091331>.

13. Mangan S., Lohrer A.M., Thrush S.F., Ellis J.I., Pilditch C.A. The Effects of Long-Term Nitrogen Enrichment on Estuarine Benthic-Pelagic Coupling // Journal of Marine Science and Engineering. – 2022. – Vol. 10. – 1955. <https://doi.org/10.3390/jmse10121955>.

14. 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>.

15. Wu S., Zhou X., Lu J., Liang D., Li D. Experimental Study on CH₄ 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>.

16. 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 (July – August). – P. 36-43. <https://doi.org/10.29013/AJT-21-7.8-36-43>.

17. 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.