

УДК 629.5

DOI: 10.31653/1819-3293-2024-1-29-66-76

ARTICLE HISTORY

Received 13.09.2024

Accepted 27.09.2024

Колегаєв Михайло Олександрович<sup>1</sup>, Бражнік Ігор Дмитрович<sup>2</sup>  
НУ "Одеська морська академія", Одеса, Україна  
smf@onma.edu.ua<sup>1</sup>, ig.brazhnik@gmail.com<sup>2</sup>

## Вдосконалення процесу підготовки вантажних танків нафтоналивних суден до вантажних операцій

Kolegaev Mykhaylo<sup>1</sup>, Brazhnik Igor<sup>2</sup>  
NU "Odessa Maritime Academy", Odessa, Ukraine  
smf@onma.edu.ua<sup>1</sup>, ig.brazhnik@gmail.com<sup>2</sup>

### Improvement of the process of preparing cargo tanks of crude oil tankers for cargo operations

***Резюме.** Розглянуті питання щодо вдосконалення процесу підготовки вантажних танків нафтоналивних суден до вантажних операцій. Зазначено, що ефективність експлуатації нафтоналивних суден крім транспортних операцій, визначається технологіями, які використовуються під час підготовки судна до прийому нового вантажу. Однією з таких технологій є інертизація вантажних танків. Метою досліджень було вдосконалення системи інертних димових газів нафтоналивного судна. Встановлено, що суттєве скорочення часу інертизації досягається за рахунок комбінованого використання чотирьох периферійних та одного центрального сопла для введення інертних газів у вантажний танк нафтоналивного судна.*

***Summary.** Considered issues related to the improvement of the process of preparing cargo tanks of oil tankers for cargo operations. It is noted that the efficiency of the operation of oil tankers, in addition to transport operations, is determined by the technologies used during the preparation of the vessel to receive a new cargo. One of such technologies is the inertization of cargo tanks. The aim of the research was to improve the inert flue gas system of the oil tanker. It was established that a significant reduction in the inertization time is achieved due to the combined use of four peripheral and*

*one central nozzle for the introduction of inert gases into the cargo tank of an oil tanker.*

Ефективність експлуатації суден, що призначені для перевезення сирової нафти та нафтопродуктів, крім транспортних операцій, визначається технологіями, які використовуються під час підготовки судна до прийому нового вантажу. Однією з таких технологій є інертизація вантажних танків, яка передує будь-яким вантажним операціям. У технології управління та контролю процесом інертизації вантажних танків на танкерах існує ряд недоліків. Перш за все до них відносяться: велика тривалість процесу; відсутність технічних засобів інтенсифікації процесу заміщення атмосфери танку; невідповідність вимірів концентрації атмосфери танку на виході реальним значенням усередині вантажного танку [1, 2]. Сукупність цих недоліків неспроможна гарантувати високу ефективність процесу інертизації вантажних приміщень танкера, з цієї причини процес інертизації вантажних танків нафтоналивного судна займає значний час.

Скорочення часу процесу інертизації є затребуваним з економічної точки зору, оскільки для танкерів з дедвейтом понад 50000 т скорочення часу зі стандартних 30 год. до 20 год. може дати річну економію палива (яке використовується для забезпечення роботи генератору інертних газів) до 90 ... 100 тис. \$ США [3, 4].

Модернізація системи інертного газу (ІГ) танкерів передбачає проведення робіт з двох напрямів: конструктивної зміни технології підготовки палива в системі генерування інертних газів та вдосконалення технології інертизації вантажних танків.

Основні принципи роботи системи ІГ на танкерах базуються на спалюванні дизельного палива в генераторі інертних димових газів, який є окремим пристроєм, що не пов'язаний із судовим контуром підготовки палива. Отриманий під час функціонування генератора інертний димовий газ після проведення низки операцій з його очищення та зниження температури спрямовується до вантажних танків [5, 6].

Відповідно до вимог SOLAS технічні показники, за якими ІГ повинні подаватися до вантажних танків нафтоналивних суден визначаються такими значеннями: концентрація кисню в ІГ, що подається, повинна бути не більше 5 %; концентрація кисню у вантажному танку – менше за 8 %; температура інертних газів – менше за 65 °С [7].

Висхідний вимушений рух атмосфери у вантажному танку з його подальшим видаленням з танку викликається дією сили з боку ІГ, що

подається у вантажний танк. Ця сила утворюється через зміну густини багатофазної суміші усередині танка, а також є наслідком взаємопов'язаних між собою процесів перенесення теплоти та передачі маси через різні концентрації ІГ та атмосфери танка. Температурна стратифікація багатофазного потоку, що рухається в суміші з атмосферою танка по висоті вантажного приміщення, також є одним із факторів, що впливають на швидкість заміщення атмосфери усередині вантажного танка [8]. За умовою зміни температури від 20 °С до 50 °С густина повітря змінюється на 10 % від 1,2 кг/м<sup>3</sup> до 1,09 кг/м<sup>3</sup> [9].

В разі визначення густини інертного газу прийнято враховувати вміст його чотирьох основних компонентів: вуглекислого газу CO<sub>2</sub>, парів води H<sub>2</sub>O, оксиду азоту NO<sub>2</sub> та кисню O<sub>2</sub>. Згідно з [4, 6, 10] вплив температури на густину інертних димових газів можна враховувати як добуток їх густини за нормальних умов на температурну поправку за виразом:

$$\rho_{\text{ІГ}} = \frac{G_{\text{ІГ}}}{V_{\text{ІГ}}} \cdot \frac{273}{273+T} = \frac{1 + \alpha L_0}{22,4(m_{\text{CO}_2} + m_{\text{H}_2\text{O}} + m_{\text{NO}_2} + m_{\text{O}_2}) + 273 + T} \cdot \frac{273}{273+T},$$

де  $\rho_{\text{ІГ}}$  – густина інертних димових газів, кг/м<sup>3</sup>;  $G_{\text{ІГ}}$  – загальна кількість інертних димових газів, що утворюються під час спалювання 1 кг палива, кг;  $V_{\text{ІГ}}$  – об'єм інертних димових газів, м<sup>3</sup>;  $T$  – температура газів, °С;  $\alpha$  – коефіцієнт надлишку повітря;  $L_0$  – теоретична кількість повітря, що необхідна для згоряння 1 кг палива, кг/кг;  $m_{\text{CO}_2} + m_{\text{H}_2\text{O}} + m_{\text{NO}_2} + m_{\text{O}_2}$ , кмоль/кг – молярний вміст в інертних димових газах вуглекислого газу, парів води, оксиду азоту, кисню відповідно.

У роботах [6, 8, 11] показано, що у разі вимушеної конвекції поле течії в замкнутому обсязі перестає залежати від механізмів теплопередачі та поточного поля температур. Цей факт безпосередньо вказує на доцільність використання подачі струменів інертного газу у вантажні приміщення танкера. Основна спрямованість досліджень механізму використання подачі струменів ІГ у вантажний танк судна має бути призначена для розв'язання завдання щодо скорочення часу його інертизації.

Метою дослідження є вдосконалення системи інертних димових газів за рахунок використання нової технології подачі струменів інертного димового газу у вантажні танки нафтоналивного судна.

Основним завданням дослідження є встановлення ступеня впливу параметрів газового потоку (якій утворюється генератором інертних димових газів) на вході в вантажний танк на характер зміни концентрації кисню у атмосфері танку. За кінцевий результат

розв'язання цього науково-прикладного завдання визначено скорочення часу інертизації вантажних приміщень нафтоналивних суден.

Об'єктом дослідження є процес інертизації вантажного танку нафтоналивного судна. Предметом дослідження є система генерування та подачі інертного димового газу.

Під час інертизації вантажного танку подача струменів ІГ повинна бути узгодженою зі потоком повітря, що рухається з невисокими швидкостями всередині жорстких стінок вантажного танку, що обмежують його. Основну зміну динамічні характеристики багатофазного потоку газів та повітря будуть зазнавати у кутових зонах [2, 3]. З цієї причини дуже важливою є подача струменів ІГ саме в ядро висхідного повітряного потоку. У цьому випадку великомасштабні турбулентні вихори в середині вантажного танку призводитимуть до скорочення часу його інертизації.

Дуже важливим питанням є кількість джерел струменів на днище вантажного танку та кут  $\alpha$  розкриття їх факелу. Найменші кути розкриття будуть призводити до подовження струменя ІГ та через це збільшувати зону турбулізації ядра потоку повітря за висотою танку. Великі кути впливатимуть на інтенсифікацію процесу тепло- і масо перенесення, особливо в кутових зонах нижньої частини вантажного танку [12].

На стадії експериментального вивчення процесу інертизації вантажного танку за рахунок удосконалення подачі ІГ були використані три технологічні схеми, які показані на рис. 1.

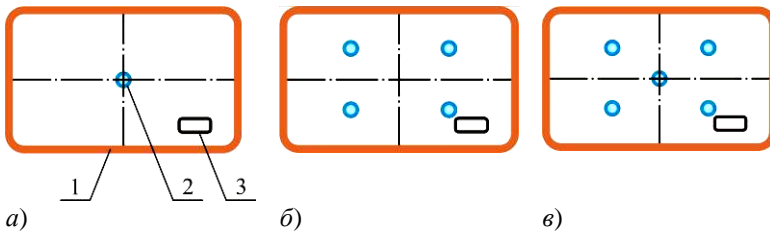


Рис. 1. Схеми подачі ІГ у вантажний танк:

*а* – перша, *б* – друга, *в* – третя схеми; 1 – вантажний танк; 2 – сопло подачі газів (розміщено на днище танку); 3 – вихідний отвір (розміщено у верхній частині танку)

Під час експериментів використовувалося три однакові за пропускну здатністю сопла, але з різними кутами розкриття  $\alpha$  конуса факела струменя інертних газів рівними  $30^\circ$ ,  $60^\circ$  та  $90^\circ$  (рис. 2).

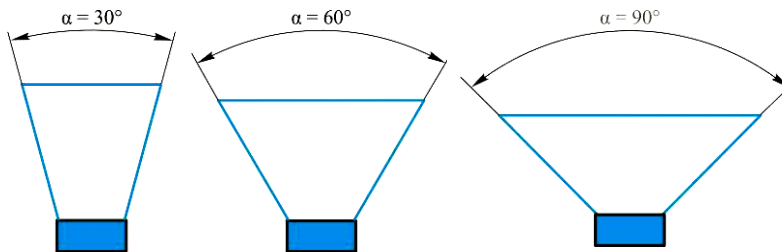


Рис. 2. Подача інертних газів в вантажні танки з різними кутами розкриття факелу

Перша схема (рис. 1, *a*) містила лише одне джерело струменя з кутом розкриття  $\alpha=60^\circ$  (рис. 2, *б*). Воно розміщувалося в центральній точці днища вантажного танку. Друга схема (рис. 1, *б*) містила чотири джерела струменів інертних газів, які розміщувалися хрестоподібно на днищі танку. Сопла встановлювалися по діагоналі в чотирьох центрах однакових прямокутних зон днища танку. Їхній кут розкриття для створення конусного факелу струменя становив  $\alpha=30^\circ$  (рис. 2, *a*). Цей кут використовувався з метою виключення взаємного впливу струменів ІГ один на інший під час їх спрямування в об'єм танку. Третя схема (рис. 1, *в*) була комбінована. Кількість джерел струменів дорівнювала п'яти. На початку процесу подачі ІГ використовувалися чотири джерела, що розміщувалися по кутам танку з кутом розкриття  $\alpha=30^\circ$  (рис. 2, *a*). Під час зниження вихідного значення концентрації кисню в повітрі на тридцять відсотків подача ІГ відбувалася лише з п'ятого – центрального джерела струменя. У ньому використовувалося сопло, що створює кут розкриття конуса факела струменя  $\alpha=90^\circ$  (рис. 2, *в*). З початком роботи центрального сопла всі кутові джерела подачі струменів ІГ відключалися.

Для всіх трьох схем подачі ІГ у вантажний танк було отримано залежність зміни концентрації кисню від часу під час процесу інертизації. Вимірювання проводилися одночасно на різних висотах у шести вантажних приміщень.

Результати порівняння зі стандартною технологією показано на рис. 3. В зв'язку з тим, що під час проведенні експериментів головним завданням був вибір найбільш ефективної схеми подачі ІГ, тривалість роботи газоаналізатора була обмежена періодом о 5 години.

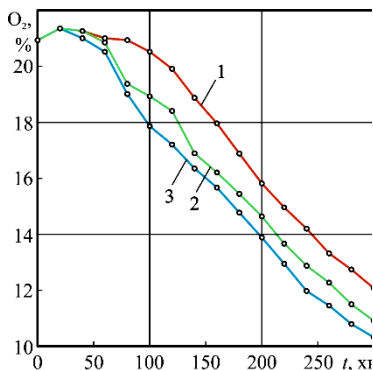


Рис. 3. Зміни концентрації кисню у вантажному приміщенні за різних кутів струменя ІГ: 1 – 60° (стандартна схема); 2 – 30°; 3 – 30° та 90°

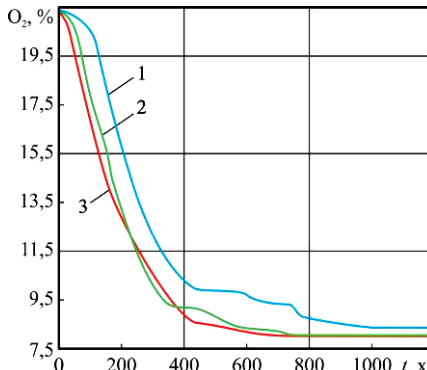


Рис. 4. Зміна концентрації кисню у вантажному приміщенні нафтоналивного судна. Подача ІГ: 1 – стандартна; 2 – удосконалена; 3 – розрахунок

Як свідчать результати, що наведені на рис. 3, якісний характер процесу зменшення концентрації кисню всередині вантажного приміщення у всіх чотирьох випадках залишався практично ідентичним. Це вказує на те, що вплив кута розкриття факела струменя ІГ на характер заміщення атмосфери танка не є основним і що на процес впливає ступінь стратифікації густини багатофазного потоку газів і повітря всередині вантажного приміщення танкера. Результати що наведені на рис. 3, також свідчать, що якість роботи другої технологічної схеми подачі ІГ у порівнянні з першою схемою краще, але найбільше скорочення часу інертизації вантажного приміщення було досягнуто з використанням третьої технологічної схеми. У порівнянні з використанням традиційної подачі ІГ зміни в кращу сторону за інших рівних умов призвели до додаткового зменшення концентрації кисню за той же період інертизації вантажного танка.

Порівняння результатів вимірювань, що описують весь процес зміни концентрації кисню у вантажному приміщенні танкера з використанням удосконаленої та стандартної технології подачі інертного газу показано на рис. 4. Також на рис. 4 наведено дані теоретичних розрахунків (суцільна лінія) процесу інертизації вантажного танка. Експериментальні дані, що показані на рис. 4, були отримані одночасно, коли проводився процес інертизації двох

ідентичних вантажних танків. Подача газу відбувалася за стандартною технологічної схеми (рис. 1, *a*) та з використанням розробленої комбінованої схеми (рис. 1, *в*).

Аналіз наведених результатів показує, що використання удосконаленої подачі ІГ призводило до кількісної, але не якісної розбіжності у змінах часу концентрації кисню усередині вантажного приміщення. Отримана розбіжність між двома експериментальними кривими свідчить про досягнення головної мети досліджень.

Використання вдосконаленої схеми подачі ІГ до вантажних танків призводить до отримання найголовнішого та основного результату – скорочення часу, що витрачається на інертизацію вантажних приміщень танкера перед вантажними операціями. Результати, що наведені на рис. 4 демонструють, що на початку процесу інертизації зміна концентрації кисню відбувається однаково незалежно від способу подачі ІГ. Суттєво розходження між кривими починається через 80 хв. після початку процесу інертизації вантажних приміщень. Залежно від способу інертизації танку кінцева концентрація кисню всередині його простору відрізняється – її значення у разі використання вдосконаленої схеми стає менше, ніж за стандартною. Вихід на стаціонарне значення концентрації кисню у вантажному танку (що дорівнює 8 %), в випадку удосконаленої подачі ІГ спостерігається приблизно через 740 хв. після початку процесу інертизації вантажних танків. Аналогічна величина концентрації за умовою інертизації за стандартною схемою досягається за більший період часу. Її вихід на стаціонарне значення спостерігався приблизно через 1700 хв. після початку процесу інертизації вантажних приміщень.

Під час проходження процесу інертизації температура всередині вантажного приміщення танкера постійно зростає. Процес зміни температури  $T$  у часі  $t$  за висотою вантажного танку  $H$  відображений на рис. 5.

Наведені залежності відповідають чотирьом вимірювальним точкам, які знаходились на різних висотах вантажного танка: 0 (на донній частині танку),  $0,25H$ ,  $0,5H$ ,  $H$  (в верхній частині танку).

За аналогією з процесом зміни концентрації кисню всередині танку також спостерігається стабілізація температури атмосфери вантажного приміщення. Результати, що наведені на рис. 5, свідчать, що починаючи з часу рівного 960 хв. температура на всіх вимірювальних рівнях перестає змінюватися і набуває свого стаціонарного значення.

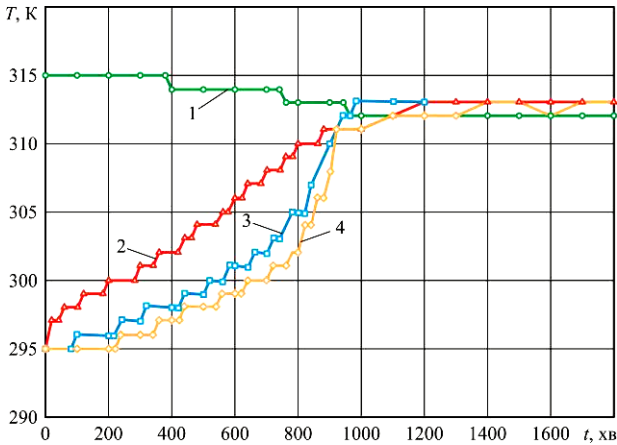


Рис. 5. Зміна температури атмосфери вантажного танка за його висотою  $H$ : 1 – 0 (донна частина); 2 –  $0,25H$ ; 3 –  $0,5H$ ; 4 –  $H$  (верхня частина)

Під час порівняння результатів вимірювань температури на виході з танку за стандартною та вдосконаленою схемами подачі ІГ було встановлено, що стабілізація температури в останньому випадку також настає раніше. Температурний градієнт, який становить  $-17\text{ }^{\circ}\text{C}$ , у випадку використання удосконаленої схеми інертизації досягався за час менший на 38,2 % порівняно зі стандартною схемою інертизації вантажних приміщень танкера.

Технологія проведення дослідницьких робіт була погоджена з відділом технічної експлуатації та менеджменту судноплавної компанії якої належить судно. Всі дослідження виконувались з забезпеченням вимог MARPOL та SOLAS [13, 14].

#### Висновки.

1. Використовувана нині технологія інертизації вантажних приміщень танкерів характеризується великою тривалістю часу цього процесу. Для розв'язання цієї проблеми запропоновано підвищити якість процесу інертизації вантажних приміщень танкера за рахунок використання удосконаленої подачі струменів інертного газу.

2. Під час інертизації танку подача струменів інертного газу має бути узгодженою зі структурою потоку повітря, що рухається з невисокими швидкостями всередині жорстких стінок вантажного танку, що обмежують його. Для цього була розроблена комбінована схема подачі інертного газу до вантажного танку судна.



3. Запропонована технологія подачі інертного газу у вантажний танк забезпечує поліпшення процесу інертизації нафтоналивного судна, що відображається в скороченні часу, який потрібен на його проведення.

4. Під час використання запропонованої вдосконаленої схеми подачі інертних газів у вантажні приміщення судна стабілізація температури всередині танку настає раніше, ніж у разі використання стандартної схеми. Підтвердженням цього є такий факт, що температурний градієнт (який становить  $-17\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) досягався за менший на 38,2 % час в порівнянні зі стандартною схемою інертизації вантажних приміщень танкера.

5. Подальші дослідження мають бути спрямовані на розробку способів технічної реалізації розробленої технології залежно від конструкції танкера та технічних характеристик суднової системи інертних газів.

#### ЛІТЕРАТУРА REFERENCES

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

2. Бражнік, І. Д. Модернизация процесса вентиляции грузовых трюмов танкера с помощью системы инертных газов // Вчені записки Таврійського національного університету ім. В.І. Вернадського. Серія: "Технічні науки". – 2019. – Т. 30(69) – № 5. – С. 129 - 133.

3. Малахов, О. В., Колегаєв, М. О., Бражнік, І. Д., Ліхогляд, К. А. Характеристики процесу тепло-масопереносу в застосуванні до вентиляції інертними газами вантажних трюмів танкерів // Суднові енергетичні установки: наук.-техн. зб. – 2019. – Вип. 39 – Одеса: НУ"ОМА". – С. 56 - 68.

4. Anand S., Suresh S., Santhosh Kumar D. Heat Transfer Studies of Supercritical Water Flows in an Upward Vertical Tube // Journal of Heat and Mass Transfer Research. – Semnan: Semnan University Press. – 2019. – Vol. 6. – Iss. 2. – P. 155 - 167.

5. Reif A., Büchner A., Rehfeldt S., Klein H. Outer heat transfer coefficient for condensation of pure components on single horizontal low-finned tubes // Heat and Mass Transfer. – Berlin: Springer, 2019 – Vol. 55. – Iss. 1. – P. 3 - 16.

6. Shervani-Tabar M.T., Parsa S., Ghorbani M. Numerical study on the effect of the cavitation phenomenon on the characteristics of fuel spray // Mathematical and Computer Modelling. – Amsterdam: Elsevier. – 2012. – No 56. – P. 105 - 117.

7. Wong S. F., Dol S. S. Turbulence Characteristics Study of the Emulsified Flow // WSEAS Journal – Transactions on Heat and Mass Transfer. – 2019. – Vol. 14. – P. 45 - 50.

8. Mohyud Din S. T., Zubair T., Usman M., Hamid M., Rafiq M., Mohsin S. Investigation of heat and mass transfer under the influence of variable diffusion coefficient and thermal conductivity // Indian Journal of Physics. – Calcutta: Springer. – 2018. – Vol. 92. – Iss. 9. – P. 1109 - 1117.

9. Sagin A. S., Zablotskiy Yu. V. Reliability maintenance of fuel equipment on marine and inland navigation vessels // Austrian Journal of Technical and Natural Sciences. Scientific journal. – 2021. – № 7 - 8. – P. 14 - 17.

10. DeWitt D. P., Incropera F. P., Lavine A.S., Bergman T.L. Principles of Heat and Mass Transfer // Chichester: John Wiley and Sons Ltd. – 2012. – 1072 p.

11. 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.

12. Malakhov O. V., Kolegaev M. O., Brazhnik I. D., Saveleva O. S., Malakhova D. O. New Forced Ventilation Technology for Inert Gas System on Tankers // International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering. – 2020. – Vol. 9. – Iss. 4. – P. 2549 - 2555.

13. Горб, С. И., Горб, А. С. Программное обеспечение для управления активами на судах // Автоматизация судовых технических средств: науч. -техн. сб. – 2018. – Вып. 24. – Одесса: ОНМА. – С. 34 - 48.

14. Горб, С. И., Поповський, О. Ю., Будуров, М. І. Оптимізація налаштування регулятора частоти обертання дизель-генератора // Автоматизація суднових технічних засобів : наук. -техн. зб. – 2023. – Вип. 28. – Одеса : НУ"ОМА". – С. 3 - 16.

**Abstract.** *Considered issues related to the improvement of the process of preparing cargo tanks of oil tankers for cargo operations. It is noted that the efficiency of the operation of oil tankers, in addition to transport operations, is determined by the technologies used during the preparation of the vessel to receive a new cargo. One such technology is the inertization of cargo tanks, which precedes any cargo operations. The purpose of the research was to improve the system of inert flue gases by using a new technology for*

*supplying jets of inert gas to the cargo tanks of the oil tanker. The main task of the research is to determine the degree of influence of the parameters of the gas flow (which is generated by the generator of inert flue gases) at the entrance to the cargo tank on the nature of the change in air concentration in the entire volume of the tank. The final result of solving this scientific and applied task is defined as a reduction in the time of inertization of cargo spaces of oil tankers. During the experiments, inert gas was supplied to the cargo hold according to three technological schemes. The first contained only one jet source with an opening angle of  $60^\circ$ , which was located at the central point of the bottom of the cargo tank. The second contained four sources of jets of inert gases, which were placed in a cross shape on the bottom of the tank. The nozzles were installed diagonally in the four centers of the same rectangular zones of the bottom of the tank. Their opening angle to create a conical jet flame was  $30^\circ$ . The number of inert gas jet supply sources of the third circuit was five. At the beginning of the inert gas supply process, four sources were used, located at the corners of the tank with an opening angle of  $30^\circ$ . During the reduction of the initial value of the oxygen concentration in the air by thirty percent, the supply of inert gas occurred only from the fifth – the central source of the jet. It used a nozzle that creates an opening angle of the cone of the jet torch of  $90^\circ$ . With the start of the central nozzle, all corner sources of inert gas jets were turned off. It has been proven that this scheme ensures the improvement of the inertization process of the oil tanker, which is reflected in the reduction of the time required for its implementation.*