

10.31653/smf48.2024.46-53

Колегаєв М.О., Бражнік І.Д.

Національний університет «Одеська морська академія»

ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ПРОЦЕСУ ІНЕРТИЗАЦІЇ ВАНТАЖНИХ ПРИМІЩЕНЬ НАФТОВИХ ТАНКЕРІВ ЗА ДОПОМОГОЮ СИСТЕМИ ІНЕРТНИХ ДИМОВИХ ГАЗІВ

Постановка проблеми. Експлуатація танкера завжди передбачає використання процесу інертизації його вантажних приміщень. Реалізація цього процесу забезпечує головні вимоги до створення та підтримання безпечної з погляду виникнення пожеж та вибухів атмосфери у вантажних танках. На танкерах, де двейт яких перевищує 8000 тонн, цей процес є попереднім перед операцією отримання нового вантажу. Використання системи інертних газів (ІГ) є обов'язковим і з 1978 р. регламентується вимогами ІМО [1]. Всі технологічні етапи виробництва, обробки та подачі ІГ до вантажних танків, є універсальними. Вони містять одноступінне обладнання та магістралі. Тому технічні проблеми, що виникають під час їх експлуатації, є ідентичними. Для їхнього опису була розроблена універсальна класифікація. Вона показана на рис. 1 і складається із трьох напрямків.

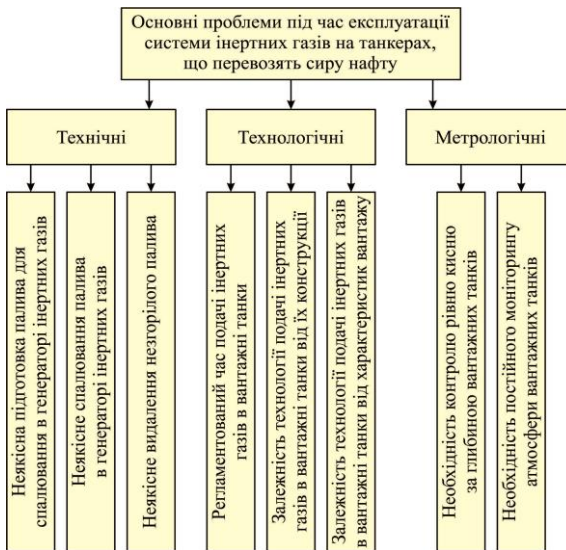


Рис. 1. Класифікація проблем, що виникають під час експлуатації системи ІГ на танкерах

Перший напрямок – технічний. Він визначається недосконалістю конструкцій технічних пристроїв, що використовуються. Другий напрямок – технологічний, який визначається недосконалим проектуванням, а також наявністю окремих недоліків у технологіях подачі ПГ, що використовуються, всередину робочого об'єму вантажного танка. Третій напрямок – метрологічний. Він визначається якістю використовуваних засобів вимірювання та контролю. До нього також входять аварії, що пов'язані з людським фактором з боку екіпажу танкера.

Під час вивчення причин аварій, що виникали у системах ПГ на танкерах, було виконано аналіз аварійних звітів. Як результат встановлено, що найбільш часто проблеми, що виникають на танкерах, пов'язані з технічними недоліками системи ПГ. До цих недоліків відносяться:

- неякісна сепарація палива та, як наслідок, слабка фільтрація важких фракцій палива, що спалюється – на завершальному етапі це виявляється в зменшенні виробленої кількості ПГ і зриву процесу горіння в робочій камері генератора ПГ;
- неякісне спалювання палива в генераторі ПГ, що виявляється у підвищеному генеруванні сажі та заниженої кількості одержуваного основного продукту горіння у вигляді вуглекислого газу CO_2 [2].

Усунення цих недоліків то, можливо за допомогою вдосконалення перелічених технологічних вузлів. Можлива також модернізація системи підготовки палива за рахунок встановлення додаткового обладнання в лінії попередньої подачі палива.

Аналіз технологічних недоліків у роботі систем ПГ на танкерах показав, що процес створення пожежо- та вибухобезпечної атмосфери всередині вантажного приміщення проводиться з економічної точки зору неефективно. Найголовнішим недоліком є підвищена тривалість процесу інертизації. Головною причиною великої тривалості процесу інертизації вантажних приміщень танкера є недосконалість використовуваних технологій [3].

Розв'язання цих проблем може бути досягнуто шляхом дослідження процесу інертизації вантажного приміщення танкера за рахунок використання удосконалених механізмів збільшення швидкості масообміну повітря та ПГ.

З урахуванням вищезазначеного можна констатувати наявність дуже актуальної проблеми. Вона полягає у розробці нових принципів функціонування системи генерування та подачі ПГ у вантажні примі-

щення нафтових танкерів. Саме ці гази забезпечують суттєве підвищення якості експлуатації танкера за рахунок зміни технології інертизації та зниження аварій, пов'язаних з якістю та тривалістю роботи таких систем.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Основні принципи роботи системи ІГ на танкерах базуються на спалюванні дизельного палива в генераторі ІГ. Він є окремим пристроєм, який не пов'язаний із судновим контуром підготовки палива. Вироблені під час функціонування генератора ІГ продукти згоряння після проведення низки операцій з їхньої очищення та зниження температури прямують до вантажних танків нафтового танкера.

Відповідно до вимог SOLAS система повинна забезпечувати:

- концентрацію кисню в ІГ – менше за 5 %;
- концентрацію кисню в вантажному приміщенні – менше за 8 %;
- температуру ІГ під час подачі у вантажні приміщення – менш за 65 °С.

Вихідний вимушений рух повітря в вантажному танку завжди обумовлений дією сили, що виштовхує, від поданих в трюм ІГ. Ця сила також з'являється через зміну густини внаслідок взаємопов'язаних між собою процесів теплоперенесення та передачі маси через різні концентрації ІГ і повітря. Температурна стратифікація потоку ІГ у суміші з повітрям за висотою вантажного танка також є одним із факторів, що впливають на швидкість витіснення повітря з вантажного приміщення судна. Вона також є складовою, що реалізує механізм передачі енергії від ІГ до повітря [4].

У роботах [5-8] показано, що у разі вимушеної конвекції поле течії в замкнутому обсязі перестає залежати від механізмів теплопередачі та поточного поля температур. Цей висновок свідчить про доцільність використання примусової подачі ІГ до вантажного танка судна. У більшості наукових праць з теорії конвекції зазвичай розглядаються процеси тепломасоперенесення в необмеженій області без присутності жорстких обмежень [6, 9]. Тільки невелика кількість робіт описує процес змішаної конвекції або дифузії газів у замкнутих обсягах, коли стінки, що обмежують потік, істотно нестационарно впливають на механізм процесу перенесення тепла або маси [7]. Для розв'язання проблеми інертизації вантажних приміщень танкера зі складною формою поперечного перерізу ці результати підходять лише першому наближенню.

У застосуванні до інертизації вантажного танка Π найближчими є результати роботи [8]. У ній розглянуто теплову конвекцію у три-вимірному прямокутному об'язі з відкритим верхом у діапазоні чисел Релея $Ra=100\dots 10^8$. Експериментальним шляхом встановлено, що:

1) за числах Релея $Ra < 10^3$ у прямокутному об'язі виникає один осередок зі слабкою стаціонарною циркуляцією. Рідина, нагріта біля стінки, піднімалася, та після опускалася біля холодної стінки. По ширині всього об'язу течія була спрямована лише вертикально (включаючи повороти поблизу верхньої та нижньої меж);

2) за числах Релея $10^3 < Ra < 10^5$ градієнт температури поблизу стін зростає, а у внутрішній ділянці течії залишався постійним. Розподіл швидкості для чисел Релея від $3 \cdot 10^4$ до $3,6 \cdot 10^6$ характеризується вертикальною симетричністю. Зростання числа Релея свідчить про просторове збільшення шириною зони ядра потоку.

У роботах [7, 10] як нижня межа виникнення вторинних течій в замкнутому прямокутному об'язі наводяться різні числа Релея. Діапазон розкиду отриманих значень становить $Ra=2,1 \cdot 10^5 \dots 3,9 \cdot 10^5$. Більш складні структури потоку виникають за числах Релея $Ra > 10^6$. В цьому випадку виникають багатоосередкові структури зі слабкими зсувними течіями на їхніх межах.

У застосуванні до процесу конвективно-дифузійного перенесення Π у суднових вантажних танках важливими є результати роботи [8]. У ній показано, що під час термогравітаційної конвекції всі коефіцієнти перенесення є постійними і не залежать від температури.

Аналіз наведених робіт показав, що тривалість процесу витіснення повітря з вантажних танків судна безпосередньо визначається такими параметрами, як швидкість подачі струменів Π та число Прандтля Pr . Чим вище їх значення, тим сильнішим буде конвективне перенесення, зростання архімедової сили та величина ежекції повітря вздовж осі дії струменя Π .

Мета роботи полягає у підвищенні експлуатаційних характеристик танкерів шляхом удосконалення системи генерування та технології подачі інертних газів у вантажні приміщення танкера.

Виклад основного матеріалу. У ході теоретичних досліджень процесу витіснення повітря з вантажного приміщення танкера за рахунок подачі Π встановлено, що під час використання примусової інертизації можливо отримати сильний висхідний перебіг повітря. Цей результат є автотельним також при зміні об'ємної витрати Π ,

що подаються, або розмірів суднового вантажного приміщення з урахуванням збереження його геометричної подоби залишатиметься завжди незмінним. Отримані конфігурації поля швидкості та поля тиску також залишатимуться ідентичними.

Подача ІГ моделювалася конічним струменем. Її джерело розташовувалося у центрі днища вантажного танка, що у розрахунках відповідало середині нижньої межі розрахункової області. Довжина факелу струменя за рахунок граничних умов задавалася рівною п'яти відсоткам від висоти вантажного приміщення [11].

Примусова подача ІГ в танк танкера з метою його інертизації повинна ґрунтуватися на структурі потоку повітря, що рухається з невисокими швидкостями, всередині вантажного приміщення, що обмежений його жорсткими стінками. Оскільки основна зміна в епорах швидкості, завихренності і температури спостерігається тільки в кутових зонах вантажного танка, тому під час проведення експериментів подача струменів ІГ проводилася в ядро висхідного повітряного потоку. У цьому випадку турбулізація стійкої течії в середній частині вантажного танка призводила до скорочення часу процесу інертизації [12].

Під час виконання експериментів, проведених в умовах роботи танкера, за умовою примусової подачі ІГ вимірювались значення величини концентрації кисню на виході з вантажного танка. Вимірювання проводилися одночасно у шести вантажних танках. На рис. 2 наведено графіки, які відповідають осередненню цих даних.

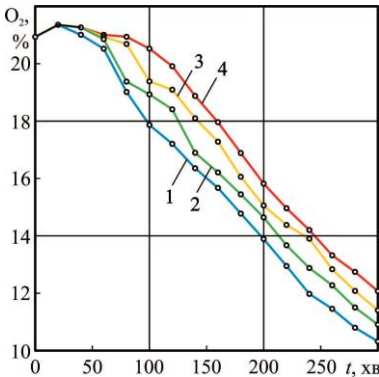


Рис. 2. Зміни концентрації кисню в трюмі за різних кутів конусності струменя ІГ: 1 – 30°; 2 – 90°; 3 – 120°; 4 – стандартна подача ІГ

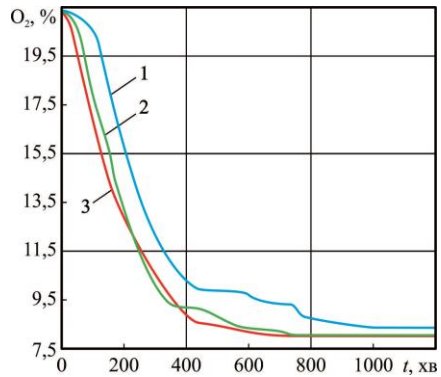


Рис. 3. Зміна концентрації кисню в трюмі танкера. Подача ІГ: 1 – стандартна; 2 – удосконалена; 3 – розрахунок

Як впливає з рис. 2, найкращі результати були отримані за кутом розпилу П рівним 30° . У цьому випадку значення концентрації кисню всередині танка були найменшими. Це пояснюється більшою дальністю дії струменя П, що потрапляють до вантажного приміщення, і відповідно збільшенням зони конвективної взаємодії П з повітрям. Також рис. 2 свідчить, що характер зміни концентрації кисню всередині танка у всіх чотирьох випадках залишався ідентичним. Цей результат дозволяє зробити висновок, що вплив кутів розкриття струменів П на характер витіснення повітря з вантажного приміщення не є основним, а процес залежить в основному від ступеня стратифікації густини П всередині робочого простору трюму.

У ході експериментів була отримана залежність, що відображає характер зменшення часу концентрації кисню в вантажному приміщенні танкера під час удосконаленою подачі П. Її порівняння зі стандартною інертизацією вантажного танка та результатами розрахунків на основі математичної моделі показано на рис. 3. Експериментальні дані на цьому графіку були отримані одночасно, коли два вантажних приміщення заповнювалися П за стандартною технологічною схемою та з використанням удосконаленої подачі П.

Аналіз результатів показує, що використання удосконаленої подачі П призводить до кількісного, але не якісного розходження в змінах концентрації кисню всередині вантажного приміщення танкера. Використання процесу удосконаленої подачі П призводило до отримання найголовнішого та основного результату – скорочення часу, що витрачається на інертизацію вантажних приміщень танкера перед отриманням нового вантажу. На графіку видно, що розбіжність між кривими починається через 80 хвилин після початку інертизації вантажного танка. Вихід на стаціонарне значення концентрації кисню менше ніж 8 % спостерігається через 740 хвилин після початку удосконаленого процесу інертизації вантажного приміщення. Аналогічна величина концентрації в ході стандартного процесу інертизації за цей період часу була більшою і становила 9,25 %. Її вихід на стаціонарне значення спостерігався приблизно через 1700 хвилин після початку процесу інертизації вантажного танка.

У відсотковому співвідношенні покращення процесу інертизації вантажних приміщень за умовою переходу від стандартного до удосконаленого процесу інертизації вантажних танків склало 13,5 %. Скорочення витраченого часу за інших рівних умов становило 56,47 %.

Висновки та перспективи подальших досліджень.

1. Однотипність технологічних контурів та обладнання, що використовується для виробництва, обробки та подачі ПГ на танкерах виявляється в ідентичності технічних проблем, що виникають під час їхньої експлуатації.

2. На танкерах доцільно використовувати удосконалену подачу ПГ до вантажного приміщення танкера з кутом розпилу в сопловій насадці рівним 30° . Через збільшення зони конвективної взаємодії ПГ з повітрям значення концентрації кисню всередині вантажного танка в цьому випадку будуть найменшими.

3. Використання процесу удосконаленої подачі ПГ призводить до скорочення часу інертизації вантажних приміщень танкера на 56,47 %.

4. Основна спрямованість подальших досліджень має бути пов'язана з удосконаленням системи підготовки палива, що використовується у судовому генераторі інертних газів. Підвищення ступеня диспергування може бути досягнуто за рахунок використання процесу кавітаційної обробки палива перед спалюванням.

Перелік використаних джерел

1. Бражник 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. Бражник И.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., Коллегаев М.О., Бражник 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. Belghazi M., Bontemps A., Marvillet C. Condensation heat transfer on enhanced surface tubes, experimental results and predictive theory // *Journal of Heat Transfer*. – New York : ASME, 2002 – Vol. 124(4). – P. 754–761.

10. DeWitt D.P., Incropera F.P., Lavine A.S., Bergman T.L. Principles of Heat and Mass Transfer / D. P. DeWitt // 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.