

Міністерство освіти и науки України
Національний університет «Одеська морська академія»

Кваліфікаційна наукова праця
на правах рукопису

Бражнік Ігор Дмитрович

УДК. 629.123

ДИСЕРТАЦІЯ
ПОЛІПШЕННЯ ПРОЦЕСІВ В СИСТЕМІ ІНЕРТНИХ ГАЗІВ
НА ТАНКЕРАХ ПРИ ПЕРЕВЕЗЕННІ НАФТИ

Спеціальність 271 - Річковий та морський транспорт

Галузь знань 27 - Транспорт

Подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів других авторів мають посилання на відповідне джерело

_____ (І. Д. Бражнік)

Науковий керівник:

Колегаєв Михайло Олександрович,
кандидат технічних наук, професор

Одеса – 2021

АНОТАЦІЯ

Бражнік І. Д. Поліпшення процесів в системі інертних газів на танкерах при перевезенні нафти. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 271 – Річковий та морський транспорт (Галузь знань 27 - Транспорт). - Національний університет “Одеська морська академія” Міністерства Освіти і Науки України, Одеса, 2021 р.

Дисертаційне дослідження спрямоване на вирішення науково-прикладного завдання – скорочення періоду часу потрібного для інертизації (зниженні концентрації кисню в вантажних танках) нафтоналивних танкерів димовими (інертними) газами. Згідно з Міжнародною Конвенцією СОЛАС та Міжнародними Вимогами щодо Безпеки для Нафтових Танкерів і Терміналів кожний танкер, дедвейтом від 8000 тонн та вище, при перевезенні нафти та нафтопродуктів повинен використовувати систему інертних газів, яка забезпечує підтримку пожеже- та вибухобезпечної мікроатмосфери в вантажних танках за рахунок зниження концентрації кисню в них до значення неперевисуючого 8,0 %.

Головною мотивацією дослідження є наявний запит практики – необхідність забезпечення підвищення економічної ефективності роботи нафтоналивного танкера.

Для розв’язання науково-технічної проблеми, що пов’язана з прискоренням процесу інертизації нафтоналивного танкера було виконано аналіз способів поліпшення процесу інертизації та вдосконалений метод подачі інертного газу всередину вантажних танків. Це в остаточному підсумку призводить до економії паливних ресурсів за рахунок скорочення часу інертизації, зменшенні періоду простою судна, збільшенні вантажообігу, що в

сукупності призводить до підвищення економічної ефективності роботи судна.

На підставі результатів аналізу було встановлено, що для вирішення проблеми прискорення інертизації вантажних танків нафтоналивного танкера необхідно визначити яким чином розподіляється концентрація кисню в їх просторі. Такий розподіл в залежності від часу інертизації постійно змінюється і напрямку визначається характером введення інертного газу та значенням розподілу тиску по висоті вантажного танка.

Обґрунтовано основний напрямок дисертаційного дослідження. Він полягає у поліпшенні процесу інертизації вантажних танків нафтоналивних танкерів за рахунок вдосконалення подачі інертного газу, що призведе до скорочення періоду часу потрібного для зниження концентрації кисню всередині вантажних танків.

Об'єктом дослідження є процес інертизації вантажних танків нафтоналивного танкера за рахунок використання вдосконаленої подачі інертного газу.

Предметом дослідження є система інертних газів нафтоналивного танкера.

Для всіх стадій наукових теоретичних та експериментальних досліджень розроблена методика їх проведення. Головними елементами розробленої технологічної карти досліджень є: наукові завдання, загальний перелік очікуваних наукових результатів; наукова значущість; наукове положення; практична цінність отриманих наукових результатів.

Для кожного сформульованого наукового завдання були обґрунтовані необхідні методи його вирішення. Для експериментальних досліджень окремо розроблена методика їх проведення і сформульовані подальші тези щодо її використання.

З метою подальшого проведення дисертаційних досліджень були сформульовані: мета; перелік головних наукових гіпотез та головне завдання досліджень, яке полягає у підвищенні економічної ефективності роботи

нафтоналивних танкерів шляхом поліпшення процесів в системі генерування і подачі інертного газу. Під час проведення досліджень обробка всіх отриманих результатів розрахунків та вимірювань здійснювалась за допомогою сучасних комп'ютерних програм і з використанням методів математичної статистики.

Перелік допоміжних завдань досліджень підпорядковує до себе наступні три завдання:

- сформулювати основні показники процесу інертизації та визначити механізм і основні параметри, що дозволяють скоротити час інертизації вантажних танків без зміни системи вироблення інертних газів і магістральних ліній їх подачі;

- встановити діапазон зміни загальних робочих характеристик розробленого поліпшеного процесу інертизації вантажних танків нафтоналивного танкера;

- розробити практичну методику оцінювання концентрації кисню в вантажних танках нафтоналивних танкерів при роботі системи їх інертизації.

Для дисертаційних досліджень було сформульовано основне наукове положення, яке полягає в тому, що підвищення економічної ефективності роботи нафтоналивних танкерів досягається поліпшенням процесу інертизації їх вантажних танків за рахунок вдосконаленої подачі інертного газу, що забезпечує значне скорочення часу потрібного для підготовки судна до прийому нового нафтового вантажу. Приведений повний опис вирішення всіх сформульованих етапів вирішення головного завдання досліджень. До таких етапів віднесено: теоретичний спосіб вирішення на підставі аналітичного методу порівняльної оцінки; використання теорії струменів для моделювання руху; статистична теорія для обчислення змін величини концентрації кисню всередині вантажного танка нафтоналивного танкера; теорія одиниць вимірювань для отримання загальних комплексів щодо процесів руху газової суміші повітря з інертним газом; чисельне моделювання процесів стандартної та поліпшеної інертизації вантажних танків нафтоналивного танкера.

В основному обсязі дисертаційної роботи приведено опис відтворення процесу інертизації вантажних танків на нафтоналивних танкерах. Розглянутий процес вдосконаленої подачі інертного газу всередину вантажного танка. Теоретичним шляхом на основі розробленої математичної моделі досліджена зміна загальних показників інертизації танкера. Встановлено, що вдосконалена подача інертного газу суттєво підвищує якісні показники процесу оскільки для довільного розміру вантажного танка нафтоналивного танкера при усіх ідентичних умовах розрахунковий час процесу інертизації зменшується на 62 %; розподіл кисню по висоті вантажного танка не є однорідним оскільки він змінюється в межах від 0,43 до 1,14 % і залежить від висоти наповнення інертним газом простору вантажного танка.

В основній частині дисертаційної роботи наведені результати експериментальних досліджень. На їх підставі з середньоквадратичною похибкою менше ніж 2,5 % встановлено, що скорочення часу інертизації танкера за рахунок переходу від стандартної до вдосконаленої подачі інертного газу може перевищувати 50 %.

Для поліпшення процесу інертизації танкера розроблена та детально описана схема розташування вимірювальних створів та соплових насадок для вдосконаленої подачі інертного газу всередину вантажного танка. Схема складена з урахуванням особливостей та головних характеристик процесу інертизації, що були отримані під час проведення досліджень.

В роботі визначена практична цінність отриманих результатів, яка полягає в наступному: вдосконалена схема подачі інертного газу в вантажні танки нафтоналивного танкера, яка не передбачає зміну основних конструктивних елементів суднової системи інертних газів, вдосконалена технологія інертизації вантажних танків, яка дозволяє скорочувати час процесу інертизації на величину 50 %, вдосконалена методика вимірювання зміни концентрації кисню в ході процесу інертизації. На підставі отриманих залежностей у часі швидкості зміни концентрації кисню та температури

суміші повітря з інертним газом можливе впровадження практичних рекомендацій в роботу судноплавних компаній, суднобудівних та ремонтних підприємств під час побудови або модернізації нафтоналивних танкерів; в навчально-освітній процес для підвищення кваліфікації судових механіків.

Усі результати виконаних наукових досліджень, а також розроблені методики і програми розрахунків впроваджені в навчальний процес Національного університету «Одеська морська академія». Вдосконалена система подачі інертного газу впроваджена на танкерах «Cape Dawson» та «PS Houston». Застосування вдосконаленої подачі інертного газу призвело до скорочення часу інертизації танкерів на 51.9 % та на 50.4 %. Впровадження підтверджено відповідними актами.

Ключові слова: нафтоналивний танкер, система інертних газів, вантажний танк, інертний газ, інертизація, концентрація кисню, вимірювальний створ, насадка для подачі інертних газів, поліпшення процесу інертизації.

ANNOTATION

Brazhnik I.D. - Improvement of Processes in Inert Gas System on Tankers During the Oil Shipment. - Qualifying scientific work as manuscript.

Dissertation for the scientific level of Doctor of Philosophy for specialties 271 - Maritime and river transport (Part of knowledge 27 - Transport). - National University "Odessa Maritime Academy" of the Ministry of Education and Science of Ukraine, Odessa, 2021.

The dissertation research is dedicated to the solution of a scientific and applied problem - reduction of the period of time required for inertization (reduction of oxygen concentration inside of cargo tanks) of oil tankers by flue (inert) gases. According to the SOLAS International Convention and the International Safety Guide for Oil Tankers and Terminals, each tanker, with a deadweight of 8,000 tons and above, must use an inert gas system when transporting oil and oil products, inert gas system provides support for fire-safe and explosion-safe microatmosphere in cargo tanks by reducing the concentration of oxygen inside of them to a value not exceeding 8,0 %.

The main motivation of the scientific work is the existing demand of practice - the need to improve the economic efficiency of the oil tanker.

To solve the scientific and technical problem associated with the acceleration of the inertization process of an oil tanker, an analysis of ways to improve the inertization process and an improved method of supplying inert gas into cargo tanks were performed. This ultimately leads to savings in fuel resources by reducing the period of time required for inertization, reducing the downtime of the vessel, increasing cargo turnover, all of these together lead to increased economic efficiency of the vessel.

Based on the results of the analysis, it was found that for solving the problem of accelerating of the inertization of cargo tanks of an oil tanker, it is necessary to

determine how the oxygen concentration is distributed inside of the cargo tanks. This distribution is constantly changing depending on the inertization time and it is directly determined by the nature of the introduction of inert gas into the cargo tank and the value of the pressure distribution along the height of the cargo tank.

The main direction of the dissertation research was substantiated. It is the improving of the process of inertization of cargo tanks of oil tankers by upgrading of the inert gas supply to cargo tanks, which should lead to the reducing of the period of time required for the reduction of the oxygen concentration inside the cargo tanks.

The object of research is the process of inertization of cargo tanks of an oil tanker with the use of upgraded inert gas supply.

The subject of research is the inert gas system of an oil tanker.

For all stages of scientific theoretical and experimental research has been developed a methodology for their implementation. The main elements of the developed research flow chart are as follows: scientific tasks, a general list of expected research results; scientific significance; scientific point; the practical value of the research results obtained.

For each formulated scientific problem were substantiated necessary methods for its solution. For experimental studies was developed a separate methodology for their implementation.

For continuation of thesis researches were formulated a purpose and made a list of the main scientific hypotheses, as well as the main goal of research work, which goal is to increase the economic efficiency of oil tankers by improving the processes in the inert gas system. During the research was carried out the processing of all the results of calculations and measurements by using modern computer programs and methods of mathematical statistics.

The list of auxiliary research tasks includes the following three tasks:

- to formulate the main indicators of the inertization process and determine the mechanism and basic parameters that reduce the inertization time of cargo tanks without changing the system of inert gases and main supply lines;

- to establish the range of change of the general working characteristics of the developed improved process of inertization of cargo tanks of the oil tanker;
- to develop a practical method for the controlling of oxygen concentration in cargo tanks of oil tankers during the inert gas system operation.

For dissertation research, the main scientific point was formulated - the increasing of the economic efficiency of oil tankers is achieved by improving the inertization of their cargo tanks through upgraded inert gas supply, which significantly reduces the time required to prepare the ship for new oil cargo. There was presented a complete description of the solution of all formulated stages for solving the main research problem. These stages include theoretical solution based on the analytical method of comparative assessment; applying the jet theory to model the motion; using statistical theory for calculating changes in oxygen concentration values inside a tanker cargo spaces; the theory of the movement of a gas mixture of air with inert gases; numerical modeling of standard and improved inertization processes of oil tanker cargo tanks.

In the main part of the scientific work was given a description of the reproduction of the inertization process of cargo tanks of oil tankers. It was researched the process of upgraded inert gas supply into the cargo tank. In a theoretical way, based on developed mathematical model was researched the change in the general indicators of a tanker's inertization. It was found that forced inert gas supply increases significantly the quality indicators of the process, as under all identical conditions the estimated time of inertization process is reduced by 62% for any size of the cargo tank; the distribution of oxygen along the height of the cargo tank is not uniform, since it varies in the range from 0.43 up to 1.14%, and depends on the height of the filling of the space of cargo tank with inert gas.

The main part of the scientific work presents the results of experimental research. On their basis, with a root-mean-square error of less than 2,5 % it was found, that the reduction in the tanker's inertization period can exceed to 50% due to the transition from standard to upgraded inert gas supply.

To improve the inertization process on tankers has been designed and described in detail a scheme for the location of measuring gates and nozzle heads for upgraded inert gas supply to the cargo tank. The scheme was developed by taking into consideration the features and main parameters of inertization process obtained during the research.

The practical value of the obtained results is marked out in the scientific work which consists in the following: improved scheme of inert gas supply to cargo tanks of an oil tanker, which does not involve changing the main structural elements of the ship's inert gas system, improved technology of inertization of cargo tanks, which reduces the period of time of the inertization process by 50%, improved method of oxygen concentration measuring during the inertization process. Based on the obtained time dependences of the rate of change in oxygen concentration and temperature of a mixture of air with inert gases, it is possible to implement recommendations into the practical work of shipping companies, including shipbuilding companies and shipyards when building or modernizing oil tankers and to introduce it into educational process at ship's engineers' extension courses.

All the results of the performed scientific research, as well as developed methods and calculation programs were introduced into the educational process of the National University «Odessa Maritime Academy». The developed systems of upgraded inert gas supply were implemented on mt «Cape Dawson» and mt «PS Houston». The use of upgraded inert gas supply resulted in savings of a 51,9 % and 50,4 % of tankers' inertization periods of time. These implementations have been confirmed by relevant acts.

Key words: oil tanker, inert gas system, cargo tank, inert gas, inertization, oxygen concentration, measuring gate, nozzle for inert gas supply, improvement of the inertization process.

Список опублікованих праць за темою дисертації

Статті у наукових фахових видання України (що входять до переліку наукових видань України, які рекомендовані МОН України для публікації результатів дисертаційних робіт на здобуття наукових ступенів доктора і кандидата наук):

1. Малахов А. В., Колегаев М. А., Бражник И. Д. Метод принудительной вентиляции трюмов на танкерах // Вчені записки Таврійського національного університету ім. В. І. Вернадського. Серія «Технічні науки». – 2018. – Т. 29(68). – № 3. – С. 166-169.
2. Malakhov O., Kolegaev M., Malakhova D., Maslov I., Brazhnik I., Gudilko R. Improvement of working parameters of ships with the use of water-fuel emulsions // Technology audit and production reserves. – 2018. – Vol. 6/3(44). – P. 14-20. DOI: 10.15587/2312-8372.2018.152255.
3. 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.
4. Малахов А. В., Колегаев М. А., Бражник И. Д. Совершенствование эксплуатационных показателей системы инертных газов на танкерах // Вісник Херсонського національного технічного університету. – 2018. – Вип. 2(65). – С. 27-34.
5. 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.
6. 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.

7. 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.

Статті в іноземних виданнях, які входять до міжнародних наукометричних баз даних Scopus та Web of Science

8. Oleksiy V. Malakhov, Mikhail O. Kolegaev, Igor D. Brazhnik, Oksana S. Saveleva, Diana O. Malakhova. New Forced Ventilation Technology for Inert Gas System on Tankers // International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering (IJITEE). – 2020. – Vol. 9. – Iss. 4. – P. 2549-2555.

Статті у збірниках матеріалів наукових конференцій

9. Малахов А. В., Колегаєв М. А., Бражнік І. Д., Гудилко Р. Г., Малахова Д. О. Управление процессом вентиляции трюмов танкера // Матеріали VIII Міжнародної науково-практичної конференції «Інформаційні управляючі системи і технології» 25-25 вересня 2019. – Одеса. – ДУ «Одеська політехніка». – С. 232-234.

10. Колегаєв М. О., Бражнік І. Д. Технологічна схема модернізації системи подачі інертних газів у вантажні приміщення танкерів // Матеріали науково-технічної конференції «Морський та річковий флот: експлуатація і ремонт» 21.03.2019-22.03.2019. – Одеса. – НУ «ОМА». – С. 266-268.

11. Колегаєв М. О., Бражнік І. Д. Обробка палива в системі інертних газів танкера // Збірник тез доповідей IX Міжнародної науково-практичної конференції «Сучасні підходи до високоефективного використання засобів транспорту» 6-7 грудня 2018. – Ізмаїл. – ДІ НУ «ОМА». – С. 100-104.

12. Бражнік І. Д., Колегаєв М. А. Совершенствование системы подачи инертных газов на танкерах // Матеріали науково-технічної конференції

молодих дослідників «Суднові енергетичні установки: експлуатація та ремонт» 14.12.2017. – Одеса. – НУ «ОМА». – С. 150-152.

13. Колегаев М. А., Бражник И. Д. Исследование процессов принудительной подачи инертных газов в грузовые помещения танкера // Матеріали науково-технічної конференції «Річковий та морський флот: експлуатація і ремонт» 22.03.2018-23.03.2018. – Одеса. – НУ «ОМА». – С. 132-137.

14. Колегаев М. А., Бражник И. Д. Модернизация системы подачи инертных газов на танкерах // Матеріали науково-технічної конференції «Транспортні технології (морський та річковий флот): інфраструктура, судноплавство, перевезення, автоматизація» 16-17 листопада 2017. – Одеса. – НУ «ОМА». – С. 227-229.

15. Колегаев М. А., Бражник И. Д. Использование кавитации в судовых системах инертных газов // Матеріали міжнародної науково-технічної конференції «Транспорт: механічна інженерія, експлуатація, матеріалознавство (ТМІЕТ – 2017)» 21-22 вересня 2017. – Херсон. – ХДМА. – С. 78-79.

16. Бражник И. Д., Колегаев М. А., Малахов А. В., Кирис А. В., Гарагуля Б. А. Модернизация процесса инертизации грузовых танков на танкерах // Матеріали XI Міжнародної науково-технічної конференції «Інновації в суднобудуванні та океанотехніці» 24-25 вересня 2020. Частина I. – Миколаїв. – НУК ім. адм. Макарова – С. 158-161.

17. Малахов О. В., Колегаев М. О., Бражник И. Д., Ліхогляд К. А. Характеристики процесу тепло-масопереносу в застосуванні до вентиляції інертними газами вантажних трюмів танкерів // Збірник тез доповідей X Міжнародної науково-практичної конференції «Сучасні підходи до високоефективного використання засобів транспорту» 12-14 грудня 2019. – Ізмаїл. – ДІ НУ «ОМА». – С. 160-164.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ.....	17
ВСТУП.....	20
РОЗДІЛ 1. СПЕЦИФІКА ЕКСПЛУАТАЦІЇ І ОСНОВНІ ТЕХНОЛОГІЧНІ ОСОБЛИВОСТІ СИСТЕМИ ІНЕРТНОГО ГАЗУ НА ТАНКЕРАХ.....	26
1.1 Аналіз типової схеми експлуатації системи інертного газу на танкерах.....	26
1.2 Класифікація основних проблем в роботі систем інертного газу на танкерах.....	31
1.3 Огляд основних технічних вузлів в системах інертного газу танкерів і способи їх модернізації.....	34
1.4 Обґрунтування теми та завдань наукового дослідження.....	39
1.5 Характеристика методів дослідження дисертаційної роботи.....	49
1.6 Висновки по розділу 1.....	55
РОЗДІЛ 2. АНАЛІЗ ТЕОРІЇ КОНВЕКТИВНО-ДИFUЗІЙНОГО ПЕРЕНОСЕННЯ	57
2.1 Короткий огляд результатів теорії тепломасообміну в застосуванні до інертизації димовими газами вантажних танків нафтоналивного танкера.....	57
2.2 Основні характеристики процесу тепломасопереносу в полі сили тяжіння в застосуванні до інертизації димовими газами суднових вантажних танків.....	60
2.3 Математична модель процесу інертизації димовими газами вантажного танка нафтоналивного танкера.....	64
2.4 Опис чисельної схеми вирішення завдання про інертизацію димовими газами вантажного танка нафтоналивного танкера.....	71
2.5 Висновки по розділу 2.....	78

РОЗДІЛ 3. ТЕОРЕТИЧНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ЗАПОВНЕННЯ ІНЕРТНИМ ГАЗОМ СУДНОВИХ ВАНТАЖНИХ ПРИМІЩЕНЬ.....	80
3.1 Теоретичне дослідження процесу інертизації димивими газами вантажного танка нафтоналивного танкера.....	80
3.2 Розрахунок процесу зміни концентрації кисню всередині вантажного танка нафтоналивного танкера.....	89
3.3 Висновки по розділу 3.....	93
РОЗДІЛ 4. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ ІНЕРТИЗАЦІЇ ВАНТАЖНИХ ТАНКІВ НАФТОНАЛИВНОГО ТАНКЕРА.....	95
4.1 Основні положення методики проведення експериментальних досліджень.....	95
4.2 Технологія процесу інертизації вантажного танка нафтоналивного танкера з використанням вдосконаленої подачі інертного газу.....	97
4.3 Основні результати експериментальних досліджень процесу інертизації вантажного танка нафтоналивного танкера.....	99
4.4 Оцінка похибки експериментальних досліджень.....	105
4.5 Висновки по розділу 4.....	110
РОЗДІЛ 5. РЕКОМЕНДАЦІЇ МОДЕРНІЗАЦІЇ СИСТЕМИ ІНЕРТИЗАЦІЇ ДЛЯ ПОЛІПШЕННЯ ПРОЦЕСІВ В СИСТЕМІ ІНЕРТНОГО ГАЗУ НА ТАНКЕРАХ.....	112
5.1 Вибір матеріалів для модернізації суднової системи інертного газу.....	112
5.2 Методика оцінювання концентрації кисню в вантажному танкі нафтоналивного танкера при роботі системи його інертизації.....	116
5.3 Методика використання роздавальних трубопроводів в системі інертного газу танкера.....	119

5.4 Висновки по розділу 5.....	126
ВИСНОВКИ.....	128
Список використаних джерел.....	131
Додатки	
(акти впровадження результатів дисертаційного дослідження).....	142

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

КВПіА - контрольно вимірювальні прилади і апаратура;

СИГ – система інертних газів;

$G_{д.г.}$ - загальна кількість димових газів, що утворюються при спалюванні 1 кг палива, кг/кг;

$V_{д.г.}$ - обсяг інертних (димових) газів, м³;

T - температура, °C;

α - коефіцієнт надлишку повітря;

L_o - теоретична кількість повітря, що є необхідною для згоряння 1 кг палива, кг/кг;

Q_m - теоретична кількість кисню, що є необхідною для згоряння 1 кг палива, кг/кг;

m_i - мольна місткість і-тої компоненти інертного газу, м³;

F_a - архімедова сила, Н;

ρ - густина, кг/м³;

ρ_∞ - густина повітря за межами вантажного танка (в атмосфері), кг/м³;

g - гравітаційна стала, м/с²;

t - час, с;

V - швидкість, м/с;

P - тиск, Па;

η - динамічна в'язкість, Па·с;

k - коефіцієнт теплопровідності, Вт/(мК);

C_p - теплоємність інертного газу при постійному тиску, Дж/К;

y - поточна координата поперечного перерізу вантажного танка, м;

τ - напруження тертя на стінці, Па;

ν - кінематична в'язкість потоку, м/с²;

V_{max} - максимальна швидкість руху повітря, м/с;

H - ширина поперечного перерізу вантажного танка, м;

V_x, V_y, V_z, V_i - відповідна компонента швидкості, м/с;

C_i, C_i' - концентрація повітря у вантажному танку танкера і в навколишньому середовищі, кг/м³;

D_i - коефіцієнт дифузії інертного газу, м²/с;

S_i - швидкість генерування (подачі) інертного газу в одиниці об'єму вантажного приміщення танкера, м/с;

r - радіус сферичної поверхні, на якій визначається температура, м;

q - інтенсивність тепловиділення, Вт;

Re - число Пекле;

r_0 - радіус теплового сферичного джерела, м;

T_∞ - температура на нескінченності, °С;

χ - температуропровідність, м²/с;

C_V - питома теплоємність, Дж/(кг·К);

u_A - відстань від поздовжньої осі симетрії потоку до центру вихору, м;

Re_m - сіткове число Рейнольдсу;

$V_{i,j,k}$ - значення швидкості в розрахунковому вузлі з координатами i, j, k , м/с;

ΔL - відстань між двома сусідніми розрахунковими вузлами в напрямку відповідної віссі координат, м;

C_p - коефіцієнт тиску;

Δh - величина тиску в поточному розрахунковому вузлі, м. вод. ст.;

ρ_c - густина суміші потоку інертного газу і повітря, кг/м³;

ρ_g - густина інертного газу, кг/м³;

V_i - швидкість потоку в розрахунковому вузлі, м/с;

$D(t)$ - дисперсія температури;

ΔT - різниця між максимальною та мінімальною температурами трубопроводу, °С;

L - довжина трубопроводу, м;

N_t - поздовжні зусилля, Н;

E_0 - модуль пружності матеріалу труби, МПа;

F - площа поперечного перерізу стінки труби, м².

$C_{O_2}^c$ - усереднена величина концентрації кисню поблизу чотирьох стінок вантажного танка, %.

$C_{O_2}^n$ - усереднена величина концентрації кисню в центральній точці вантажного танка, %.

ВСТУП

Актуальність теми. Вже з початку 30-х років минулого століття на нафтоналивних танкерах використовується система інертних газів (СІГ). Вона забезпечує підтримку пожеже- та вибухобезпечної мікроатмосфери в вантажних танках при завантаженні, перевезенні та вивантаженні нафти та нафтопродуктів мийки вантажних танків, а саме - ця система повинна підтримувати в будь-якій частині вантажного танка мікроатмосферу з вмістом кисню не більше ніж 8 % за обсягом (у цьому випадку мікроатмосфера всередині вантажного танка вважається інертною) [35, 36]. Використання системи інертного газу є обов'язковим і регламентується Міжнародними Вимогами щодо Безпеки для Нафтових Танкерів та Терміналів [36] та Міжнародною Конвенцією з Охорони Людського життя на морі – 1974 року [35].

Особлива зацікавленість морських судноходних компаній до інертного газу зростала починаючи з 1970-х років, хоча установка систем інертних газів залишалася ще повністю добровільною. У цей період багато страхових компаній пропонували преміальні знижки для танкерів із системами інертних газів на борту. Як наслідок, генератори інертного газу були встановлені на багатьох суднах, але фактично їх не експлуатували.

Проте різке збільшення кількості вибухів танкерів наприкінці 1970-х років дало поштовх до змін. Головний поворотний момент стався у 1981 році, коли класифікаційні товариства почали вимагати встановлення систем інертного газу для запобігання подальших катастроф і забезпечення безпеки на борту танкерів. Щоб отримати право на страхування, великі судна, що перевозять нафту та нафтопродукти, повинні були встановити та використовувати системи інертних газів. Всього за кілька років майже всі великі танкери світу мали на борту діючу систему інертного газу.

Згідно з рішенням ІМО з 1 січня 2016 року використання систем інертних газів стало обов'язковим для нафтоналивних танкерів дедвейтом від 8000 тонн та більше [71].

Економічна ефективність експлуатації нафтоналивного танкера, крім транспортних операцій, визначається технологіями, які використовуються під час підготовки судна до прийому нового вантажу. Особливе значення надається якості експлуатації системи інертних газів танкера. Скорочення часу на інертизацію буде суттєво впливати на вартісні показники роботи судна за рахунок економії палива, яке витрачається для роботи системи інертних газів, та за рахунок збільшення вантажообігу судна.

З урахуванням вищевикладеного можна констатувати, що в роботі свого рішення вимагає дуже актуальна науково-технічна задача. Вона полягає в поліпшенні процесів в системі генерування і подачі інертного газу, що буде забезпечувати істотне підвищення економічної ефективності експлуатації нафтоналивного танкера за рахунок скорочення терміну інертизації його вантажних танків.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.

Дисертаційна робота спрямована на реалізацію Закону України "Про Основні засади (стратегію) державної екологічної політики України на період до 2030 року". 2019, № 16; Морської доктрини України на період до 2035 року (Постанова Кабінету Міністрів України від 17.05.2012 р.); Національній транспортній стратегії України на період до 2030 року (Розпорядження Кабінету міністрів України від 30.05.2018, № 430-р), Стратегії імплементації положень, директив та регламентів Європейського Союзу у сфері міжнародного морського та внутрішнього водного транспорту (Розпорядження Кабінету міністрів України від 11.10.2017, № 747-р); програмам і планам виконання фундаментальних науково-дослідних робіт Міністерства освіти і науки України та національного університету «Одеська морська академія» на період 2017 - 2021 рр.

Мета і завдання досліджень. Метою дослідження є підвищення економічної ефективності роботи нафтоналивних танкерів шляхом поліпшення процесів в системі інертних газів.

Поставлена мета досягається вирішенням таких допоміжних завдань:

- сформулювати основні показники процесу інертизації і способи технічного вдосконалення системи інертизації нафтоналивного танкера;
- визначити механізм і основні параметри, що дозволяють скоротити час інертизації вантажних танків танкера без зміни генератора інертних газів і магістральних ліній їх подачі;
- встановити діапазон зміни основних робочих характеристик розробленого поліпшеного процесу інертизації вантажних танків;
- вдосконалити практичну методику оцінки концентрації кисню в вантажних танках нафтоналивних танкерів при роботі системи їх інертизації.

Об'єктом дослідження є процес інертизації вантажних танків нафтоналивного танкера.

Предметом дослідження - система інертних газів нафтоналивного танкера.

Методи дослідження. У роботі використані наступні методи досліджень: аналітичний метод для проведення порівняльної оцінки процесу інертизації вантажних танків під час стандартної та вдосконаленої подачі інертного газу; теорія струменів при дослідженнях процесу руху інертного газу на виході з насадок на днищі вантажних танків; теорія статистики при обробці результатів експериментальних вимірювань величини концентрації кисню всередині вантажного танка нафтоналивного танкера; теорія вимірювання для отримання основних критеріальних залежностей процесів руху повітря і інертного газу всередині вантажних танків; метод кінцевих різниць для чисельного моделювання процесів стандартної та поліпшеної інертизації вантажних танків нафтоналивного танкера; чисельні методи апроксимації при побудові графічних залежностей концентрації кисню від робочих показників процесу подачі інертного газу в вантажні танки.

Наукова новизна отриманих результатів полягає в тому, що:

- підвищення економічної ефективності роботи нафтоналивних танкерів поліпшенням процесу інертизації їх вантажних танків за рахунок вдосконаленої подачі інертного газу, що забезпечує значне скорочення часу потрібного для інертизації вантажних танків;
- вперше отримані результати, що вказують на можливість скорочення тривалості процесу інертизації вантажних танків нафтоналивних танкерів незалежно від їх конструкції і дедвейту судна;
- вперше отримані результати, що вказують на наявність динамічно стійких структур суміші повітря і інертного газу в кутових зонах вантажних танків;
- вперше встановлено, що в порівнянні зі стандартною операцією інертизації використання вдосконаленої подачі інертних газів призводить до більш швидкої стабілізації величин кінцевої концентрації кисню і температури суміші повітря з інертним газом всередині вантажних танків танкера.

Практична цінність отриманих результатів полягає в наступному:

- вдосконалена схема подачі інертного газу в вантажні танки нафтоналивного танкера, яка не передбачає зміну основних конструктивних елементів судової системи інертизації;
- вдосконалена технологія інертизації вантажних танків, що дозволило скоротити час процесу інертизації на 50 %;
- розроблена нова методика вимірювання зміни концентрації кисню в ході процесу інертизації вантажних танків, яка дозволяє в режимі реального часу проводити аналіз його поточного стану в мікросфері танка.

Основні результати дисертаційних досліджень реалізовані: на танкерах «Cape Dawson» і «PS Houston»; в навчальному процесі Національного університету «Одеська морська академія» при створенні курсу лекцій і лабораторних робіт з дисциплін: “Запобігання забрудненню морського

середовища з суден” і “Безпека життєдіяльності на річковому та морському транспорті”, що підтверджено відповідними актами впровадження.

Персональний внесок здобувача. Результати, які складають основний зміст дисертаційної роботи, отримані автором самостійно.

У роботах, опублікованих у співавторстві, автору належать:

[9] – формулювання математичної моделі термогравітаційної конвекції в судновому вантажному танкі;

[24] – проведення та опис експериментів щодо швидкості зміни концентрації кисню під час інертизації танкера;

[25] – опис загальних проблем використання суднових систем інертизації;

[27] – формулювання та опис умовної класифікації проблем систем інертного газу на танкерах;

[30] – обґрунтування методу поліпшеної інертизації, проведення та обробка вимірювань щодо концентрації кисню під час інертизації танкера;

[31] – формулювання та опис схем вдосконаленої подачі інертного газу для поліпшеної інертизації вантажних танків нафтоналивного танкера та вимірювання швидкості зміни концентрації кисню під час їх використання;

[32] – формулювання загальних принципів використання примусового конвекційного процесу зниження концентрації кисню в вантажних танках нафтоналивних танкерів;

[33] – розробка та опис математичної моделі процесу руху повітря під час інертизації вантажного танка;

[34] – опис загальної суднової технологічної схеми інертизації танкера;

[75] – проведення розрахунків та експериментів щодо процесу інертизації танкера з використанням вдосконаленої подачі інертного газу.

Апробація результатів дисертації. Основні положення роботи та окремі її розділи доповідалися і отримали схвалення на науково-технічних конференціях професорсько-викладацького складу Національного університету "Одеська морська академія" 2017-2021 рр.

Також результати дисертації отримали апробацію на наступних конференціях: Міжнародна науково-технічна конференція "Транспорт: механічна інженерія, експлуатація, матеріалознавство (ТМІЕТ - 2017)", Херсон 2017; науково-технічна конференція "Транспортні технології (морський та річковий флот): інфраструктура, судноплавство, перевезення, автоматизація", Одеса 2017; науково-технічна конференція молодих дослідників "Суднові енергетичні установки: експлуатація та ремонт", Одеса 2017; науково-технічна конференція "Річковий та морський флот: експлуатація и ремонт", - Одеса, 2018; XI Міжнародна науково-технічна конференція "Інновації в суднобудуванні та океанотехніці", - Миколаїв, 2020.

Публікації. Основні матеріали дисертаційної роботи і головні результати проведених досліджень були опубліковані в сімнадцяти наукових роботах (серед них сім - у фахових збірниках, з яких 2 статті опубліковані без співавторів і 1 стаття - в міжнародних наукометричних базах), а також 9 апробаційних матеріалів.

РОЗДІЛ 1.

СПЕЦИФІКА ЕКСПЛУАТАЦІЇ ТА ОСНОВНІ ТЕХНОЛОГІЧНІ ОСОБЛИВОСТІ СИСТЕМИ ІНЕРТНИХ ГАЗІВ НА ТАНКЕРАХ

1.1 Аналіз типової схеми експлуатації системи інертних газів на танкерах

На нафтоналивних танкерах дедвейтом від 8000 тонн та вище, використовується система інертних газів (СІГ). Вона повинна використовуватися при вивантаженні нафти і нафтопродуктів, при роботі систем очищення вантажних танків. Також її використання на танкері є попередньою стадією перед отриманням нових вантажів [36]. Використання на танкерах системи інертних газів є обов'язковим, що регламентується Міжнародними вимогами щодо безпеки для нафтових танкерів та терміналів [36] та Міжнародною конвенцією з охорони людського життя на морі – 1974 року [35].

Основні технологічні операції системи інертних газів на нафтоналивних танкерах базуються на спалюванні дизельного або важкого палива в генераторі інертного газу [34]. Продукти згоряння, що отримуються при функціонуванні генератора інертного газу після проведення ряду операцій по їх очищенню і зниженню температури направляються в вантажні танки [30].

При заповненні простору вантажного танка інертний газ поступово витісняє повітря, в результаті чого концентрація кисню всередині вантажного танка знижується до значення не більш ніж 8 % від загального обсягу танка. При таких значеннях концентрації кисню мікроатмосфера, що отримується всередині вантажного танка вважається пожеже- та вибухобезпечною [35, 36]. Головне призначення системи інертних газів танкера є функція захисту вантажних танків нафтоналивного танкера від пожежі та вибуху шляхом

створення і постійного підтримання в вантажних танках інертної (пожеже- та вибухобезпечної) мікроатмосфери. Ця система повинна підтримувати в будь-якій частині вантажного танка атмосферу з вмістом кисню не більше ніж 8 % у вільному від вантажу просторі танка [35, 36].

При подачі інертних газів в вантажні танки в них створюється надлишковий тиск. Він створює позитивний градієнт швидкості при виштовхуванні повітря з вантажного танка і, в свою чергу, перешкоджає притоку зовнішнього повітря у внутрішню частину його простору.

Відповідно до вимог Міжнародної конвенції з охорони людського життя на морі 1974 року [35] параметри, які повинна забезпечувати система інертних газів при подачі інертного газу в вантажні танки нафтоналивного танкера визначаються наступними значеннями:

- концентрація кисню в інертному газі що подається – не більше ніж 5 %;
- температура інертного газу – не більше 65 °C при подачі в вантажні танки;

Аналіз конструктивних розмірів вантажних танків на танкерах показав, що вони не є універсальними і при переході від судна одного дедвейту до судна іншого дедвейту між собою завжди відрізняються [25, 73]. З цієї причини в нормативних документах відсутня універсальна вимога до об'ємної продуктивності системи інертних газів в залежності від розмірів вантажних танків. Для вирішення цієї проблеми на танкерах прийнято до використання одне загальне правило - загальна кількість (об'ємна витрата) інертних газів, що виробляється має становити в кількісному вираженні величину, що дорівнює 125 % від величини об'ємної витрати суднового насосного обладнання, що використовується при розвантаженні судна на режимі максимальної продуктивності [36]. В ході аналізу досвіду експлуатації танкерів встановлено, що така величина об'ємної витрати інертних газів дозволяє заповнювати вантажні танки з урахуванням запасу на процес часткового вивітрювання з робочого простору деякого об'єму інертного газу.

Для забезпечення всіх перерахованих вище умов, незалежно від конструктивного виконання танкера, завжди використовується система вироблення і подачі інертних газів. Ця система є стандартною і її конструктивне виконання на танкерах відрізняється тільки в геометричних розмірах (відстанях між елементами, діаметрах труб, що використовуються і т. і.) компонування основних вузлів і пристроїв та в потужностях встановлених генераторах інертного газу [8, 32].

Головні компоненти системи інертних газів показані на рисунку 1.1

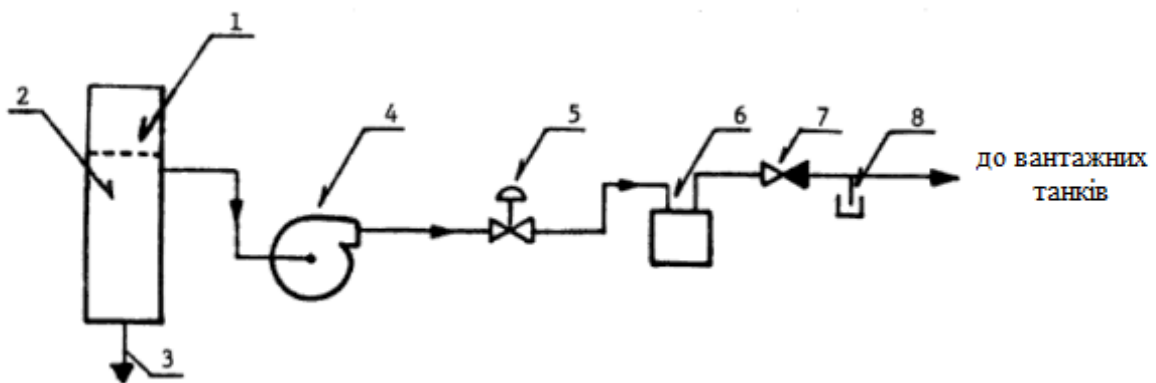


Рисунок 1.1 – Головні компоненти системи інертних газів:

1 – генератор інертного газу; 2 – скруббер; 3 – дренажна лінія; 4 – нагнітач; 5 – регулювальний клапан; 6 – палубний гідравлічний затвор; 7 – безповоротний клапан; 8 – переривник тиску/вакууму

Призначення основних компонентів системи інертних газів: генератор інертного газу 1 – пристрій для вироблення димового газу; скруббер 2 – пристрій, призначений для очищення димового газу та його охолодження; дренажна лінія 3 – призначена для сброса охолоджуючої води зі скруббера; нагнітач 4 – пристрій для подальшого руху інертних газів від генератора до вантажних танків; регулювальний клапан 5 – регулює потік інертних газів до вантажних танків; палубний гідравлічний затвор 6 – пристрій, призначений для запобігання зворотного руху газів з вантажних танків у випадках зупинки роботи системи інертних газів; безповоротний клапан 7 – призначений для

запобігання зворотного потоку нафти або нафтопродуктів з вантажних танків у випадку переповнення, переривник тиску/вакууму – пристрій, призначений для захисту вантажних танків від руйнування тиском або вакуумом.

Приклад системи інертних газів для танкера "Cape Dawson" компанії "Rio Dawson" Schiffahrtsgesellschaft mbH & Co. KG., на якому проводилась основна частина натурних досліджень, показаний на рисунку 1.2.

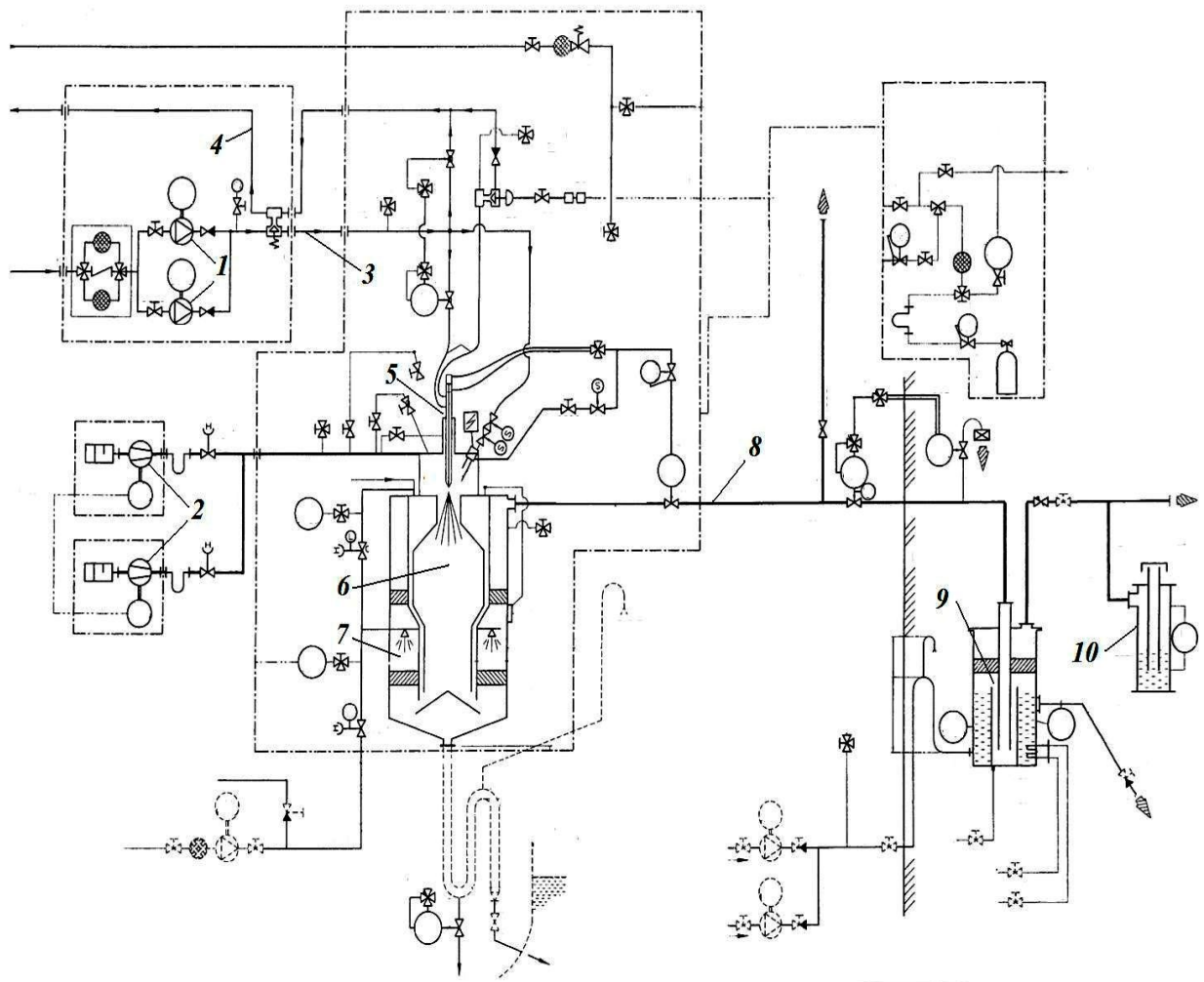


Рисунок 1.2 – Система вироблення і подачі інертних газів на танкері "Cape Dawson" компанії "Rio Dawson" Schiffahrtsgesellschaft mbH & Co. KG:
 1 – паливні насоси; 2 – повітряні нагнітачі; 3 – лінія подачі палива;
 4 – байпасний паливопровід з клапаном; 5 – форсунка; 6 – камера згоряння генератора; 7 – скруббер; 8 – лінія подачі інертних газів; 9 – гідрозатвор;
 10 – переривник тиску/вакууму

В міру спалювання палива димовий (інертний) газ, що утворюється, направляється з центральної камери згоряння в скрубер 7 – пристрій, який призначений для очищення інертних газів від сажі та оксидів сірки.

Другим призначенням скрубера є зниження температури інертних газів. У скрубері 7 інертний газ знижує свою температуру з 300 °С до не перевищующої 65 °С. Очищення інертного газу і зниження його температури відбувається за рахунок процесів тепло і масообміну між інертним газом і водою. Взаємодія інертного газу і струменів води організована з максимальною ефективністю, яка досягається за рахунок використання дрібнодисперсного розпилю води та схеми руху у вигляді протитечії.

Повітря на згоряння палива в генераторі інертних газів подається з використанням окремої повітряної магістралі. В самому її початку встановлено два повітряних нагнітача 2. Як видно на рисунку 1.2 ці нагнітачі підключені за схемою паралельного з'єднання. У номінальному режимі експлуатації працює тільки один з нагнітачів, а другий є резервним. Саме за рахунок роботи повітряних нагнітачів 2 в системі генерування інертного газу створюється величина робочого тиску, який забезпечує весь наступний рух інертного газу в від генератора до вантажних танків.

Для видалення води в нижній частині скрубера 7 встановлена дренажна лінія скидання.

Очищений інертний газ зі значеннями температури, які відповідають умовам, що запобігають займанню атмосфери в вантажних танках, зі скрубера надходять в лінію подачі інертного газу 8. На цій лінії встановлено гідрозатвор 9. Його основне призначення полягає у виключенні зворотної течії інертного газу з вантажних танків в сторону генератора. В якості робочої рідини в гідрозатворі використовується забортна вода. Також, на лінії подачі інертного газу 8, встановлено переривник тиску/вакууму 10. Його основне призначення полягає у захисту вантажних танків від їх можливого зруйнування тиском або вакуумом. Повний опис принципів роботи

гідрозатвора 9 і переривника тиску/вакууму 10 добре представлено в роботах [4, 11, 15, 39].

1.2 Класифікація основних проблем в роботі систем інертних газів на танкерах

Здійснений огляд систем інертизації показав, що всі технологічні контури генерування, обробки і подачі інертного газу, що входять в систему інертизації танкерів є універсальними. Вони містять в більшості випадків однотипне обладнання та магістралі [9, 23, 24]. З цієї причини можливо стверджувати, що всі основні проблеми, які виникають на танкерах під час експлуатації систем інертизації, також є ідентичними. Для їх опису була розроблена умовна класифікація. Вона показана на схематичному рисунку 1.3 [7, 8]. Як показано на схемі існує три окремих напрямки, які включають в себе вже конкретні специфічні суднові проблеми.



Рисунок 1.3 – Приклад класифікації основних проблем в роботі систем інертних газів на танкерах [7, 8]

Першим напрямком є технічний. В цьому випадку всі аварійні проблеми в роботі системи інертних газів викликані недосконалістю конструкцій технічних пристроїв, що використовуються.

Другий напрямок (технологічний) визначається проектувальними прорахунками або наявністю сильних недоліків в технології, що використовується для подачі інертного газу всередину вантажного танка.

Третій напрямок (метрологічний) визначається якістю засобів вимірювання і контролю, що використовуються, а також особистісним фактором з боку екіпажу танкера.

В ході досліджень при вивченні причин аварій, що виникають в системах інертизації на танкерах, був виконаний аналіз сімнадцяти актів розслідування аварійних подій. В кінцевому підсумку був зроблений висновок про те, що найбільш часто, проблеми що виникали на судах, були пов'язані саме з технічними недоліками системи інертних газів. До таких недоліків відносяться:

- погана сепарація палива і, як наслідок, слабка фільтрація важких фракцій в паливі, яке спалюється, що виражається в змінах виробляємої кількості інертного газу і зриву процесу горіння в камері згоряння генератора інертного газу;
- неякісне спалювання палива в генераторі інертного газу, що виражається в підвищеному виробленні сажі і занижених обсягах виробляемого газу;
- порушення герметичності скрубберної водяної системи охолодження інертного газу в результаті чого відбувається забруднення морського середовища нафтопродуктами.

Зміна в кращу сторону всіх технічних недоліків може бути проведеною за рахунок вдосконалення окремих технологічних вузлів, що перераховані, або модернізації системи підготовки палива за рахунок встановлення додаткового обладнання в лінії подачі палива [26]. Найпростішим рішенням в цьому випадку може бути використання окремо встановленого технічного пристрою

- вузла диспергування важкого палива з використанням процесу кавітації. У цьому випадку за рахунок подрібнення важких фракцій може бути досягнутий позитивний результат щодо зниження аварійних показників процесу спалювання палива [57, 74].

Аналіз технологічних недоліків в роботі систем інертних газів на танкерах показує, що процес інертизації вантажних танків проводиться з економічної точки зору неефективно. Найголовнішим недоліком є підвищена тривалість процесу інертизації, що при сплаті стоянки судном в порту або експлуатації у відкритому морі виражається великим збитковим грошовим еквівалентом. В середньому, в залежності від місця розташування порту (розглядається лінія США - Канада), одна година стоянки танкера дедвейтом 12000 тонн на причалі коштує 550 доларів США. Зменшення часу, що витрачається на інертизацію вантажних танків, в середньому на п'ятьнадцять годин при середній частоті операцій інертизації вантажних танків чотири рази на місяць може привести до отримання додаткового економічного ефекту в 33000 доларів США на місяць. Також, економія може бути отримана від скорочення кількості палива, що споживається для вироблення інертного газу. В середньому системи інертизації танкера дедвейтом 12000 тонн потребляє 120 кг дизельного палива за годину. При вартості палива 600 доларів США за одну тонну скорочення процесу інертизації на 15 годин дає економію в 1080 доларів США за одну повну інертизацію. Якщо інертизація танкера проводиться чотири рази на місяць, то за рік додаткова економія палива в грошовому еквіваленті може скласти 51840 доларів США.

Головною причиною завищеної тривалості процесу інертизації нафтоналивних танкерів є недосконалість технологій, що використовуються. Витіснення повітря з усього простору вантажного танка відбувається без використання будь-яких розрахунків і додаткових механізмів збільшення швидкості процесу масообміну між повітрям і інертним газом [61].

Третім основним напрямком причин виникнення аварійних ситуацій на танкерах є метрологічний. У цьому випадку через неправильно обрані місця

установки або неякісну роботу газоаналізаторів процес контролю концентрації кисню в вантажних танках не завжди є однозначним. У більшості випадків це може призводити до завищених значень залишкової концентрації кисню в танкі, що інертизується. При такій роботі метрологічного забезпечення причинами неякісної або завищеної по тривалості інертизації вантажних танків можуть бути неправильна методика відбору проб повітря, що видаляється.

У більшості випадків контроль концентрації кисню або парів вантажу (після його відвантаження) здійснюється на виході з вантажного танка танкера без урахування специфіки його конструкції. Рекомендовані точки розміщення створів для відбору проб повинні розташовуватися всередині кожного вантажного танка і їх повинно бути декілька. Як показано нижче в п'ятому розділі в описі розробленої схеми проведення вимірювань, перша точка відбору проб повітря повинна лежати на висоті, що відповідає середині вантажного танка.

1.3 Огляд основних технічних вузлів в системах інертних газів танкерів і способи їх вдосконалення

Загальний опис системи генерування і подачі інертного газу був частково розглянутий в розділі 1.1, де на рисунках 1.1 і 1.2 були приведені її складові елементи і описаний конструктивний і технологічний зв'язок між ними. Більш детальна схема цієї суднової системи показана на схематичному рисунку 1.4, де видно, що основними технічними вузлами в системах інертних газів танкерів є:

- камера згоряння генератора ІГ 7, яка являє собою окремий вузол спалювання дизельного або важкого палива з метою отримання інертного газу;

- скрубер 9, який призначений для зниження температури інертного газу в ході процесу теплообміну з охолоджувальною водою та очищення інертного газу від твердих частинок та оксидів сірки;

- лінія подачі інертного газу у вигляді магістрального трубопроводу 12 з відгалуженнями;

- гідрозатвор 15 для запобігання зворотного руху інертного газу від вантажних танків в сторону генератора або передачі в цьому напрямку стрибків тиску;

- автоматизована гідравлічна арматура вантажних танків танкера;

- засоби контрольно-вимірювальної апаратури 11 (термометри, манометри, вакуумметри, витратоміри, датчики і т.і.).

Впорскування повітряно-паливної суміші через форсунки в генератор інертного газу 7 забезпечується за рахунок роботи паливних насосів 1 і повітряних нагнітачів 2. Для подачі палива найчастіше використовуються насоси об'ємного типу - гвинтові або шестерінчасті. При роботі в системі інертних газів, яка використовувалась на танкері «Care Dawson» вони забезпечували подачу палива в діапазоні масової витрати від 100 до 120 кг/год.

В якості нагнітачів повітря для вироблення інертного газу встановлені повітряні нагнітачі 2. Максимальна продуктивність кожного з них становить 1500 м³/год. В ході подачі регулювання витрати повітря, а також включення в роботу тільки одного нагнітача, здійснюється з використанням запірних вентилів 6, що є автоматично керованими.

Повітря в генератор інертного газу надходить по двох лініях 4. Перший повітропровід (на рис. 1.4 позначений верхньою лінією 4) призначений для підготовки паливо-повітряної суміші.

При роботі генератора інертного газу 7 повітря, що подається витрачається також на індикацію процесу горіння, коли сигнальний факел горить від робочої суміші, яка утворюється в камері основного змішування 5. Другий повітропровід (на рисунку 1.2 позначений нижньою лінією 4)

є магістральним і з'єднує повітряні нагнітачі з камерою згоряння генератора інертного газу.

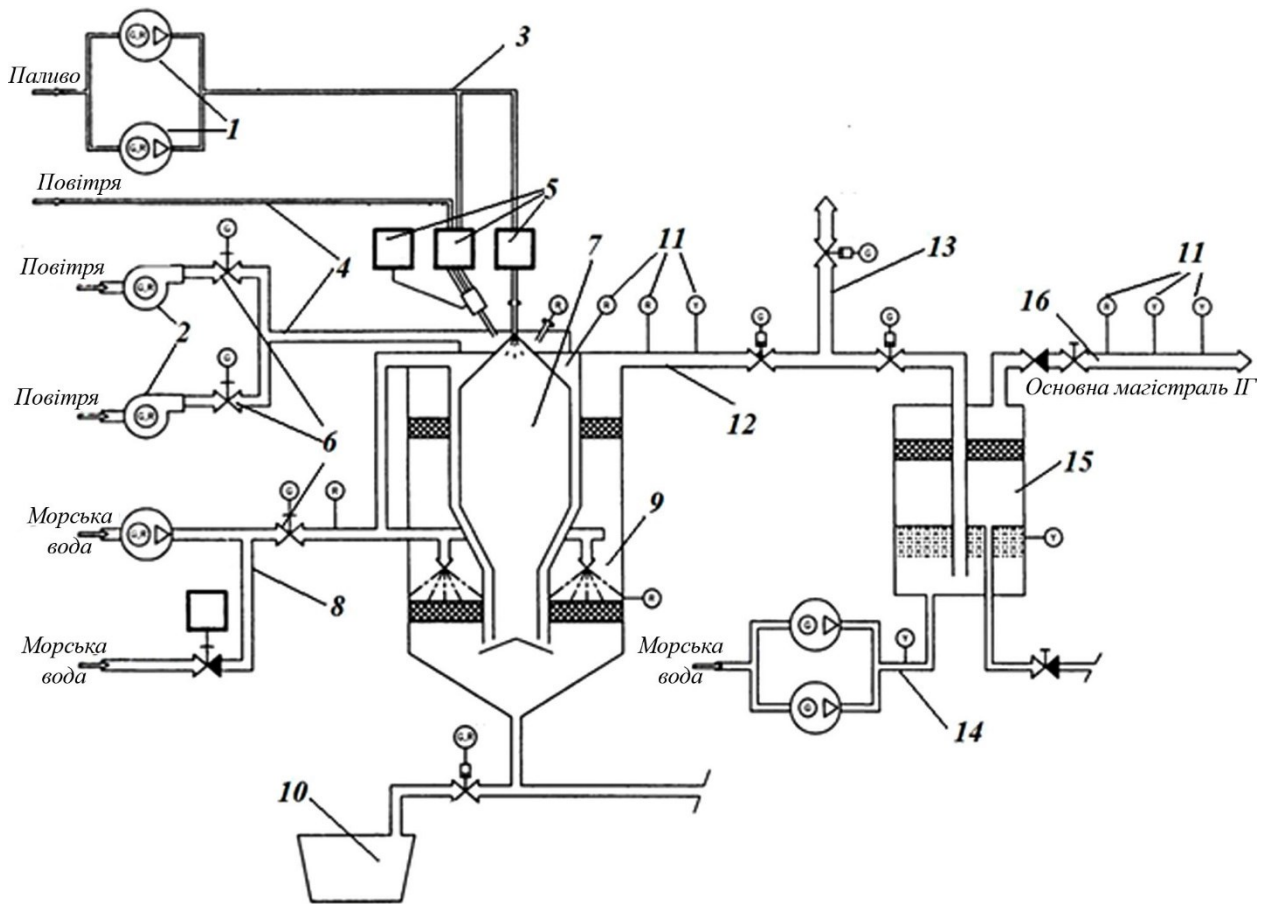


Рисунок 1.4 – Основні елементи системи вироблення і подачі інертного газу танкера "Cape Dawson":

1 - паливні насоси; 2 - повітряні нагнітачі; 3 - паливна магістраль;
4 - повітроводи; 5 - система запалювання з вузлом підготовки паливо-повітряної суміші і індикацією її горіння; 6 - регулятори подачі повітря;
7 - генератор ІГ; 8 - магістраль подачі заборотної води; 9 - скруббер;
10 - дренажний танк; 11 - елементи КВПіА; 12 - магістраль роздачі ІГ;
13 - лінія відведення для скидання ІГ в атмосферу; 14 - лінія подачі заборотної води в гідрозатвор 15

Система підпалу з вузлом підготовки паливо-повітряної суміші і індикацією її горіння на рисунку 1.4 позначена як 5. Вона встановлена у верхній частині камери згоряння генератора інертного газу 7. Її три основні

елементи призначені для розпалювання робочої суміші всередині робочої камери генератора, контроль і реалізацію процесу сумішоутворення палива та повітря і безпосередньо уприскування робочої суміші в камеру згоряння генератора.

Для займання паливної суміші і підтримки процесу горіння використовується тільки один пальник з тиском повітря, що подається від 0,5 до 1 МПа (на рисунку 1.2 позначений, як 5 - центральний квадрат). Підпал паливної суміші здійснюється з використанням електричної свічки запалювання (на рисунку 1.2 вона позначена, як 5 - лівий квадрат). Основний потік робочої суміші подається на форсунку високого тиску (на рисунку 1.2 вона позначена, як 5 - правий квадрат). Починаючи з моменту підпалу палива час виходу процесу горіння робочої суміші на номінальний режим генерації інертного газу становить від 90 до 120 секунд.

Одним з найголовніших недоліків системи подачі палива в генератор інертних газів полягає в відсутності системи попереднього підігріву і диспергування палива. Згідно з вимогами виробника, на спалювання в генератор інертного газу має подаватися дизельне паливо, або важке паливо. Дуже часто в цілях економії використовуються менш якісні види палива. Зазвичай такі марки палив характеризуються присутністю твердих включень або високов'язких з'єднань вуглеводнів у вигляді бітумів, асфальтенів, смол і т.і. В ході підготовки робочої суміші на горіння ці включення практично не змінюють свій фракційний і дисперсний склад в результаті чого при подачі в генератор інертного газу 7 вони можуть створювати наступні технологічні проблеми:

- забивати прохідні канали форсунки високого тиску, що призводить до зниження їх загальної витратної спроможності і падіння продуктивності системи інертних газів в цілому;

- приводити до неповного згоряння робочої суміші з отриманням меншого обсягу інертного газу в порівнянні з випадком повного згоряння і виробленні підвищеної кількості сажі;

- приводити до швидкого випадання осаду в нижній частині камери згоряння генератора інертного газу і, як наслідок, до забивання його прохідних каналів на шляху в простір скрубера і зменшення корисного об'єму камери згоряння.

Рішення перерахованих вище проблем може бути реалізовано шляхом використання додаткового підігріву палива під час його руху до генератора інертного газу 7 [23, 24]. Доповнення паливної магістралі 3 нагрівальним супутниковим паропроводом може змінити її робочі показники в кращу сторону.

Другим, більш якісним варіантом вирішення проблеми щодо усунення високов'язких включень вуглеводнів в паливі, може бути встановлення на паливній магістралі додаткового технічного вузла. Цей пристрій повинен виконувати функції гомогенізатора, змінюючи фракційний склад палива до необхідного за нормативами ступеня дисперсності [25].

В якості одного з технічних рішень для реалізації процесу диспергування палива може виступати його кавітаційна обробка. За рахунок процесів руйнування, що виникають в рухомому потоці, дрібних бульбашок (приєднаного і розчиненого повітря, а також парів палива) буде відбуватися активна зміна структури всього потоку. Буде отримане його рівномірне перемішування і дроблення до малого розміру всіх частинок високомолекулярних фракцій вуглеводнів [81, 86].

Камера згоряння генератора інертного газу 7 безпосередньо з'єднана зі скруберам 9. При його роботі середня витрата забортної води становить $100 \text{ м}^3/\text{год}$. Вода подається відцентровими насосами з максимальним напором, що дорівнює 20 м.в.ст., а її максимальна температура може доходити до 32°C . Для подачі і розпилю води в робочій камері скрубера використовується від шести до дев'яти тефлонових форсунок спірального типу.

У скрубери 9 охолодження інертного газу здійснюється на першій стадії за рахунок процесу випаровування частини охолоджуючої рідини при прямому контакті з рухомими інертними газами. На другій стадії охолодження

і очищення інертного газу відбувається при проходженні через вологі фільтраційні касети.

Після скрубера 9 інертний газ потрапляє в роздаткову магістраль 12. На цій магістралі окрім різних засобів обліку і контролю 11 встановлена лінія відводу 13 для скидання інертного газу в атмосферу. В основному вона призначена для аварійних режимів експлуатації, коли існує необхідність миттєвої зупинки роботи системи інертних газів з припиненням подачі газу в вантажні танкі. Також ця лінія включається в роботу в разі стрибків тиску в магістралі 12.

В кінці роздаткової магістралі 12 безпосередньо перед місцем розгалуження ліній подачі інертного газу в вантажні танки розташований гідрозатвор 15. В якості робочої рідини в ньому використовується забортна вода. Її подача в гідрозатвор по лінії 14 здійснюється за допомогою одного з двох відцентрових насосів, що є з'єднаними за схемою паралельного підключення. Один з насосів завжди є резервним.

Призначенням гідрозатвора 15 є повна герметизація роздаткової магістралі інертного газу 12 з боку вантажних танків. В основному небезпечне виникнення противотоку може виникати в силу специфіки проведення вантажних операцій або аварій з виникненням вибуху або пожежі вантажу у вантажному танкі. У цьому разі можливі випадки коли вантаж, що завантажуються в танк, або інертний газ, або пари, що займалися і т.і. можуть почати свій рух в сторону магістралі 12 і привести до виникнення ще більш важких наслідків.

1.4 Обґрунтування теми та завдань наукового дослідження

Основна спрямованість досліджень полягає в поліпшенні процесів в системах інертних газів на нафтоналивних танкерах для скорочення

тривалості процесу інертизації їх вантажних танків. Основними факторами, що визначають якість реалізації такого процесу, є поточний і остаточний вміст кисню всередині вантажного танка і час виходу на остаточні значення його максимально допустимої концентрації.

Можна констатувати, що в даний час обидва ці показники підтримуються або досягаються шляхом використання застарілих технологічних рішень, які вимагають проведення вдосконалення [6, 7].

Загальний вигляд діаграми, що показує взаємний вплив поточних значень концентрацій кисню і вуглеводнів, які визначають вибух мікроатмосфери в вантажному танку нафтоналивного танкера, показаний на рисунку 1.5. На наведеній діаграмі також відображені контури їх граничних меж.

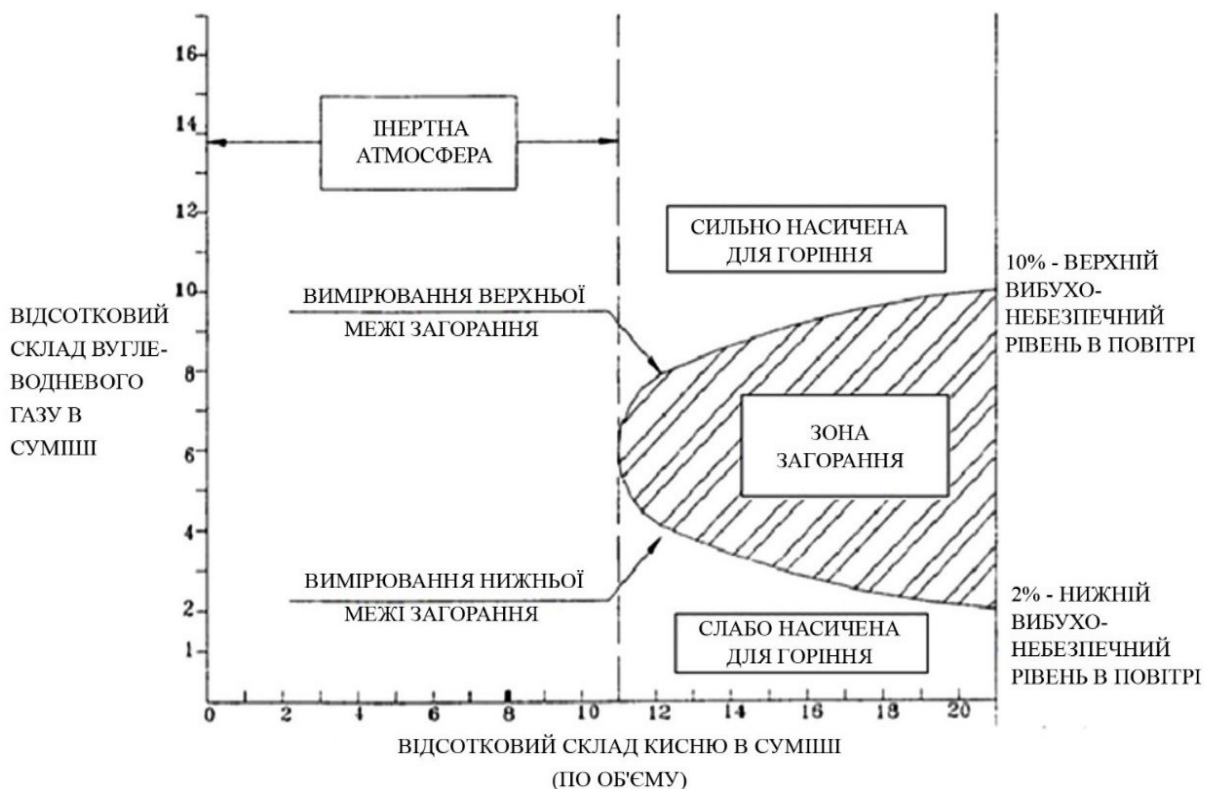


Рисунок 1.5 – Загальна діаграма взаємного впливу поточних значень концентрацій кисню і вуглеводнів [36]

Величина концентрації кисню визначається вимогами вибухобезпеки. Залежно від виду проведеної технологічної операції (завантаження і

вивантаження вантажу, інертизація, видалення інертного газу), виду вантажу (газолін, важке паливо, сира нафта і т. і.), місця проведення робіт (причал, відкрите море, сухий док) загальна діаграма чисельних кордонів концентрації кисню і вуглеводнів в мікροатмосфері вантажного танка може змінюватися.

Для всіх перерахованих вище умов нижче наведені:

- загальна діаграма меж концентрації кисню і вуглеводнів, що визначають вибух мікροатмосфери в вантажному танкі нафтоналивного танкера при його розвантаженні в море. Вона показана на рисунку 1.6;

- загальна діаграма меж концентрації кисню і вуглеводнів, що визначають вибух мікροатмосфери в вантажному танкі нафтоналивного танкера під час його завантаження. Вона показана на рисунку 1.7;

- загальна діаграма меж концентрації кисню і вуглеводнів, що визначають вибух мікροатмосфери в вантажному танкі нафтоналивного танкера під час його завантаження сировою нафтою. Вона показана на рисунку 1.8;

- загальна діаграма меж концентрації кисню і вуглеводнів, що визначають вибух мікροатмосфери в вантажному танкі нафтоналивного танкера під час вивантаження з нього сирової нафти. Вона показана на рисунку 1.9;

- загальна діаграма меж концентрації кисню і вуглеводнів, що визначають вибух мікροатмосфери в вантажному танкі нафтоналивного танкера при його мийці після вивантаження з нього сирової нафти. Вона показана на рисунку 1.10;

- загальна діаграма меж концентрації кисню і вуглеводнів, що визначають вибух мікροатмосфери в вантажному танкі нафтоналивного танкера при його мийці в морі. Вона показана на рисунку 1.11;

- загальна діаграма меж концентрації кисню і вуглеводнів, що визначають вибух мікροатмосфери в одиночному вантажному танкі нафтоналивного танкера (всі інші заповнені інертними газами) при його

заповненні повітрям і витискуванні інертного газу. Вона показана на рисунку 1.12;

- загальна діаграма меж концентрації кисню і вуглеводнів, що визначають вибух мікроатмосфери в вантажних танках нафтоналивного танкера при постановці судна в сухий док. Вона показана на рисунку 1.13;

- загальна діаграма меж концентрації кисню і вуглеводнів, що визначають вибух мікроатмосфери в танках водяного балласта танкера при виявленні в них парів вантажа. Вона показана на рисунку 1.14;

- загальна діаграма меж концентрації кисню і вуглеводнів, що визначають вибух мікроатмосфери в танках водяного балласта танкера при їх інертизації. Вона показана на рисунку 1.15.

Розгляд чисельних характеристик концентрацій кисню і вуглеводнів на діаграмах 1.6-1.15 показує, що при створенні в мікроатмосфері вантажного танка нафтоналивного танкера пожеже- та вибухобезпечних умов концентрація кисню всередині танка може змінюватися в значних межах. У чисельних значеннях цей діапазон становить від 8 до 21 %. З цієї причини для розробки принципів інертизації вантажних танків нафтоналивного танкера було прийнято умову, що безпечною межею є найменше значення. Концентрація кисню всередині вантажного танка незалежно від умов його експлуатації і виду вантажу, що завантажується або вивантажується, не повинна перевищувати величину 8 %.

Вимушений рух вгору повітря у вантажних танках нафтоналивного танкера завжди викликається дією сили тиску від інертного (димового) газу, якій подається в вантажні танки. Ця сила виникає через зміни густини внаслідок взаємопов'язаних між собою процесів теплопереносу та передачі маси інертного газу та повітря. Градієнт густини, що виникає, в першу чергу обумовлений різними значеннями концентрацій інертного газу і повітря на початку процесу інертизації.

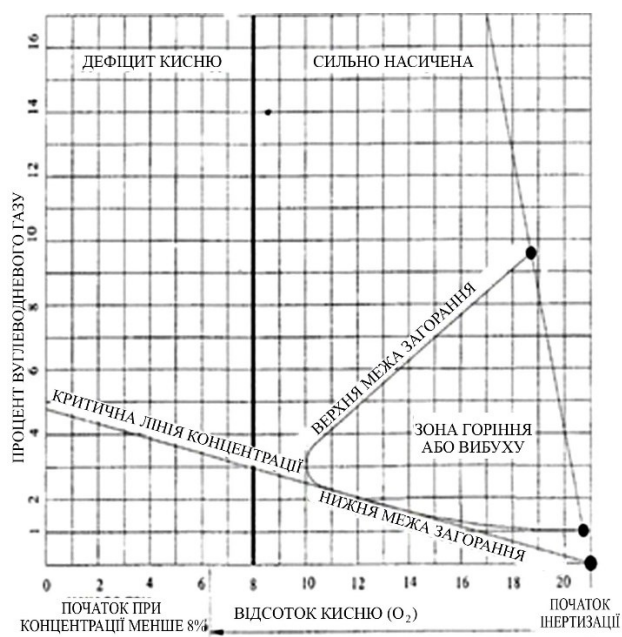


Рисунок 1.6 – Діаграма для
вантажних танків при вивантаженні
вантажу в морі

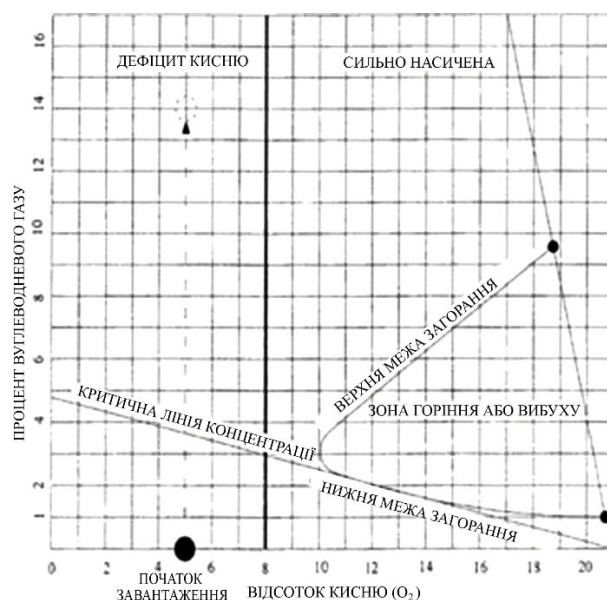


Рисунок 1.7 – Діаграма для
вантажних танків при завантаженні
вантажу

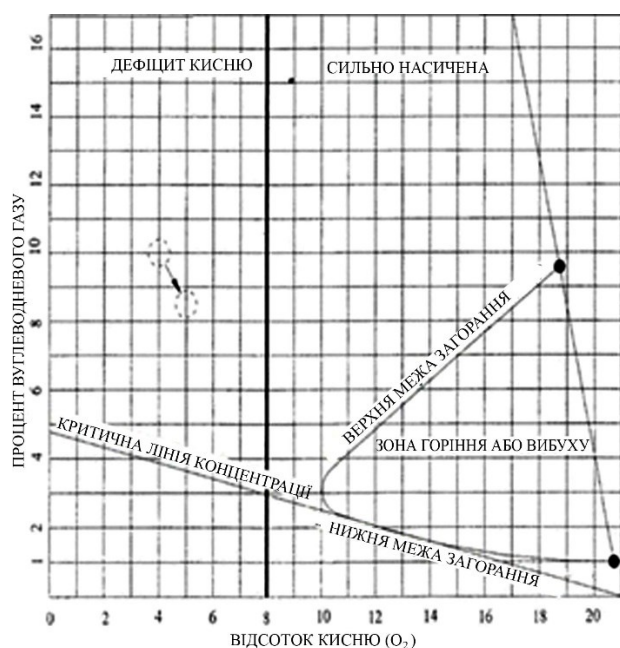


Рисунок 1.8 – Діаграма для
вантажних танків при завантаженні
сирої нафти

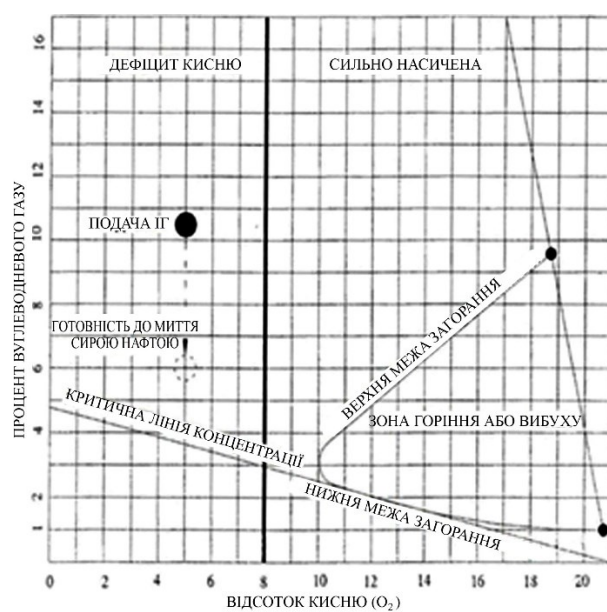


Рисунок 1.9 – Діаграма для
вантажних танків при вивантаженні
сирої нафти

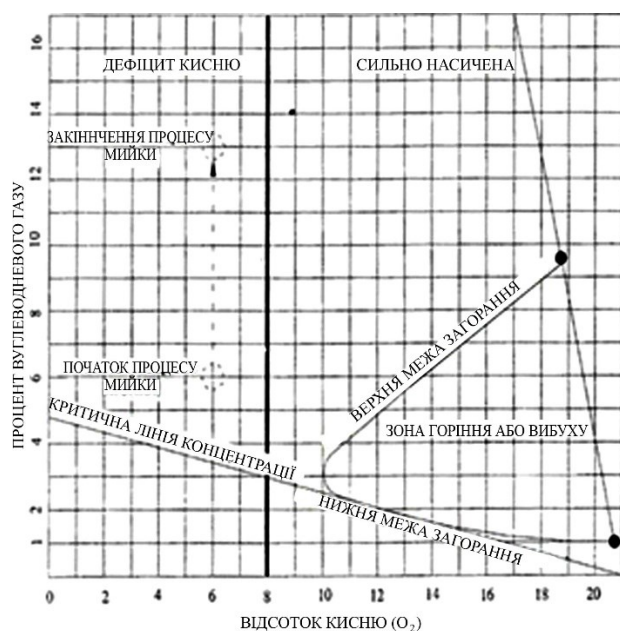


Рисунок 1.10 – Діаграма для вантажних танків при їх промивці після вивантаження сирої нафти

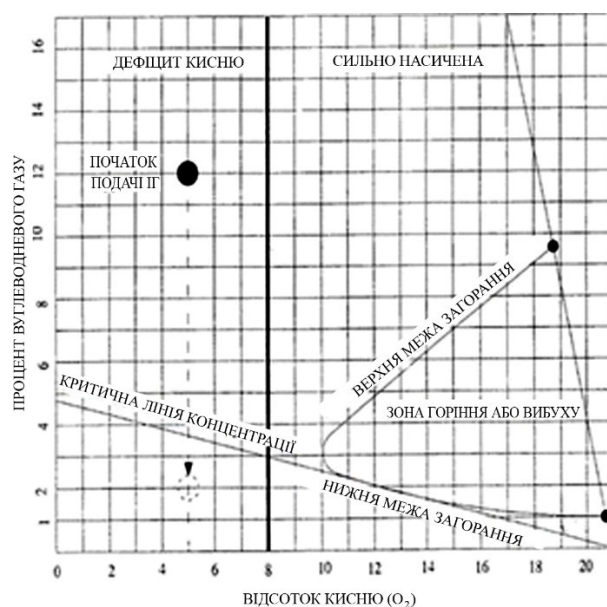


Рисунок 1.11 – Діаграма для вантажних танків при їх промивці в морі

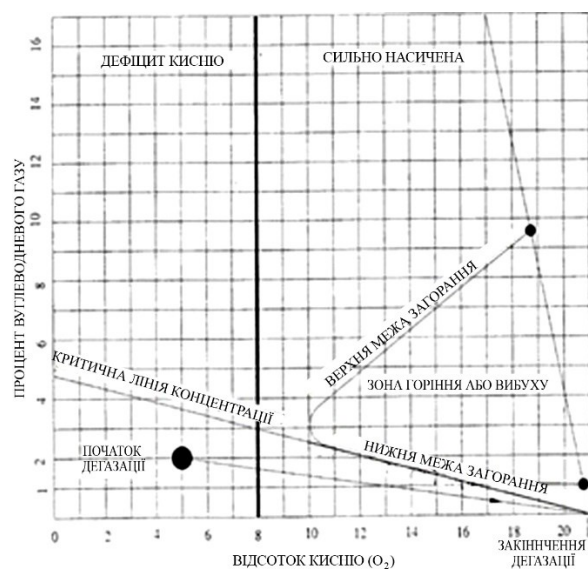


Рисунок 1.12 – Діаграма заміщення інертного газу повітрям в одиночному вантажному танкі

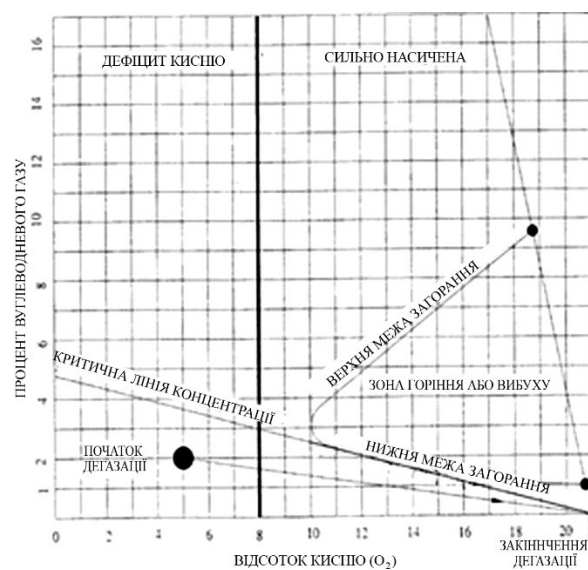


Рисунок 1.13 – Діаграма для видалення інертного газу з вантажних танків при постановці судна в сухий док

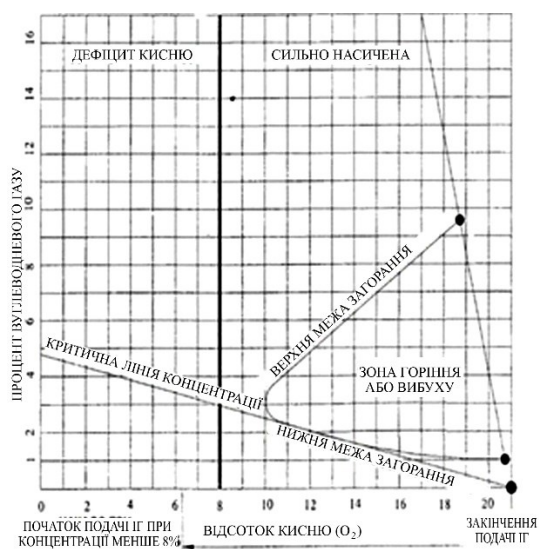


Рисунок 1.14 – Діаграма подачі інертного газу в баластні танки при виявленні в них парів вантажу

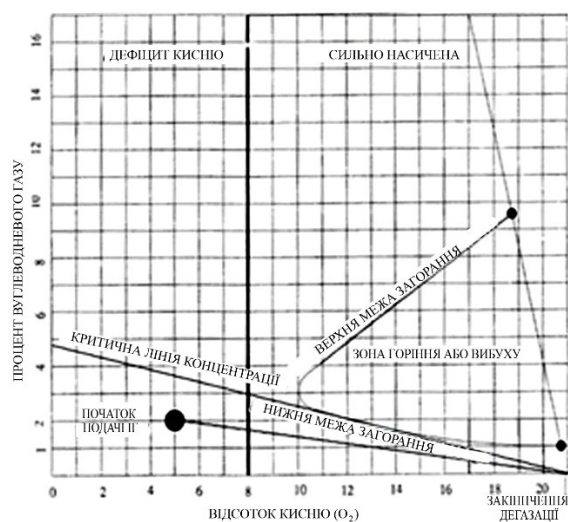


Рисунок 1.15 – Діаграма подачі інертного газу в баластні танки при їх інертизації

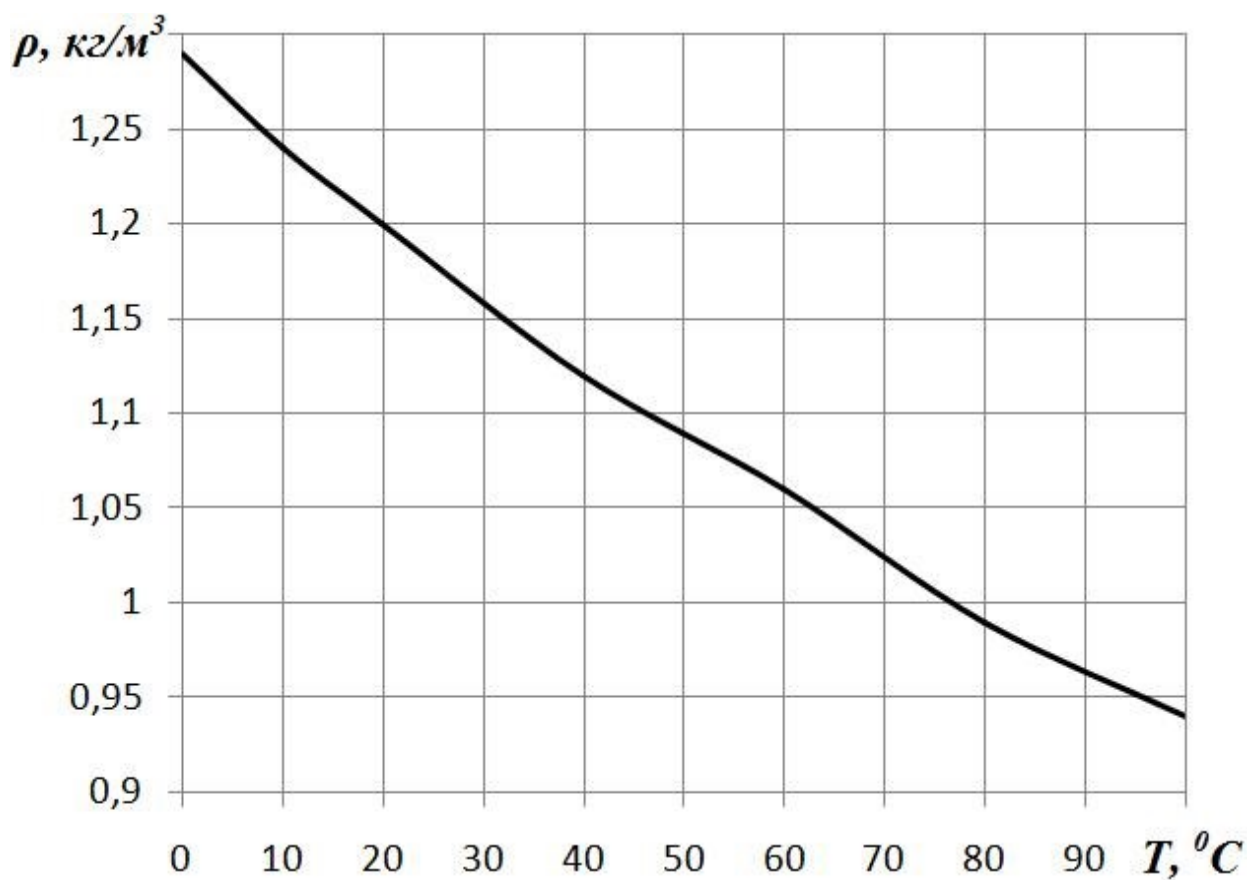


Рисунок 1.16 – Зміна густини повітря з ростом температури [3]

Температурна стратифікація потоку інертного газу в суміші з повітрям по висоті танка також є одним з факторів, що впливають на швидкість витіснення повітря з танка судна [63]. Саме вона реалізує механізм передачі енергії від інертного газу до повітря. На графіку рисунка 1.16 взятому з роботи [3] видно, що при зміні температури від 20 до 80 °С густина повітря змінюється на 20 % від 1,2 до 0,99 кг/м³.

При роботі генератора інертного газу в ході згоряння палива практично завжди основними хімічними компонентами, що складають на виході обсяг інертного газу в довільній концентрації згідно з [16, 44, 46, 54, 61] є:

- вуглекислий газ CO₂ з об'ємним вмістом від 1 до 10 %;
- оксид вуглецю CO з об'ємним вмістом від 0,01 до 5 %;
- вода H₂O з об'ємним вмістом пари від 0,5 до 4 %;
- азот N з об'ємним вмістом від 76 до 78 %;
- кисень O₂ з об'ємним вмістом від 2 до 5 %;
- неканцерогенні з'єднання вуглеводнів CH з об'ємним вмістом від 0,009 до 0,5 %;
- альдегіди з об'ємним вмістом від 0,001 до 0,009 %;
- діоксид сірки SO₂ з об'ємним вмістом від 0,001 до 0,03 %;
- сажа з об'ємним вмістом від 0,01 до 1,1 г/м³;
- бензопірен з об'ємним вмістом до 0,01 г/м³.

При визначенні густини інертного газу в більшості випадків можна вважати, що обсяг інертного газу, що розглядається, є складовою з чотирьох базових компонентів - CO₂, H₂O, N, O₂.

В роботі [46] для розрахунків теплової потужності котла наведені середньостатистичні показники цих чотирьох базових компонентів. Вони показані в таблиці 1.1.

У більш загальному випадку густину інертного газу можна розрахувати, як помноження густини інертного газу при нормальних умовах (0 °С і 760 мм рт. ст.) на температурну поправку за виразом [46]:

$$\rho_{\text{д.г.}} = \frac{G_{\text{д.г.}}}{V_{\text{д.г.}}} \frac{273}{273+T} = \frac{1 + \alpha L_0}{22.4(m_{\text{CO}_2} + m_{\text{H}_2\text{O}} + m_{\text{NO}_2} + m_{\text{O}_2})} \frac{273}{273+T} =$$

$$= \frac{1 + \alpha \left(\frac{Q_m}{0.21} \right)}{22.4(m_{\text{CO}_2} + m_{\text{H}_2\text{O}} + m_{\text{NO}_2} + m_{\text{O}_2})} \frac{273}{273+T}, \quad (1)$$

де: $\rho_{\text{д.г.}}$ - густина димових газів, кг/м³; $G_{\text{д.г.}}$ - загальна кількість димових газів, що утворюються при спалюванні 1 кг палива, кг/кг; $V_{\text{д.г.}}$ - обсяг димових газів, м³; T - температура, °C; α - коефіцієнт надлишку повітря; L_0 - теоретична кількість повітря, що необхідна для згоряння 1 кг палива, кг/кг; Q_T - теоретична кількість кисню, яка необхідна для згоряння 1 кг палива, кг/кг; m_i - мольний зміст i -тої компоненти інертного газу (розраховується за емпіричними формулами [16]), м³.

Таблиця 1.1

Характеристики основних компонент інертного газу [16]

Компонент	Об'ємний зміст, %	Густина при 100 °C, кг/м ³	Масовий склад, %	Теплоємність після утилізації, кДж/(кг·K)
CO ₂	8,64	1,977	13,82	1,076
H ₂ O	18,46	0,598	12,2	2,026
NO ₂	70,18	1,25	71,99	1,076
O ₂	1,72	1,429	1,99	1,004

В роботі [18] показано, що в разі вимушеної конвекції поле течії в замкнутому просторі перестає залежати від механізмів теплопередачі і поточного поля температур. Цей факт безпосередньо вказує на доцільність використання примусової подачі струменів інертного газу в вантажний танк судна.

Основна спрямованість досліджень механізму використання подачі струменів інертного газу в вантажні танки судна повинна бути призначена для вирішення завдання про скорочення часу процесу його повного заповнення інертним газом із залишковими значеннями концентрації кисню, що не перевищують 8%.

З урахуванням викладеного вище була сформульована основна науково-технічна задача. Вона полягає в поліпшенні процесів в системі генерування і подачі інертного газу в вантажні танки нафтоналивних танкерів, що забезпечуює істотне підвищення економічної ефективності експлуатації судна за рахунок скорочення часу інертизації вантажних танків.

Таким чином, проблема покращення головних експлуатаційних показників роботи суднової системи інертного газу (часу інертизації, остаточної концентрації кисню в вантажному танку, витрат палива на генерування інертного газу і т. і.) є дуже актуальною і перспективною. Це обумовлює вибір теми дисертації в наступній редакції: “Поліпшення процесів в системі інертних газів на танкерах при перевезенні нафти”.

Для вирішення основного завдання було сформульовано ряд допоміжних завдань:

- сформулювати основні показники процесу інертизації димовими газами вантажних танків нафтоналивних танкерів та визначити механізм і основні параметри, що дозволяють скоротити час інертизації вантажних танків без зміни системи вироблення інертних газів і магістральних ліній їх подачі;
- встановити діапазон зміни основних робочих характеристик розробленого поліпшеного процесу інертизації вантажних танків нафтоналивного танкера;
- розробити практичну методику оцінки концентрації кисню в вантажних танках нафтоналивних танкерів при роботі системи їх інертизації.

Актуальність тематики дисертаційного дослідження може визначатися вимогами до якості та безпеки експлуатації нафтоналивних танкерів під час

зміни типу вантажу і скорочення часу проведення процесу інертизації вантажних танків нафтоналивного танкера з покращенням показників його собівартості.

Вдосконалення технологій щодо поліпшення процесу інертизації вантажних танків нафтоналивного танкера може розглядатися як головна складова наукової новизни дисертаційного дослідження.

Скорочення часу інертизації нафтоналивного танкера під час проведення підготовки вантажних танків може значно підвищити економічну ефективність експлуатації судна за рахунок скорочення витрати палива, потрібного для інертизації димовими газами вантажних танків нафтоналивних суден, а також за рахунок збільшення вантажообігу судна, що пов'язане зі скороченням періоду часу потрібного для підготовки нафтоналивного танкера до транспортування нового вантажу.

Використання комбінації теоретичних досліджень, що збігаються з результатами інших дослідників та з набором критеріїв оцінки їх якості експериментальними дослідженнями обумовлюють необхідність їх подальшого впровадження в практику експлуатації нафтоналивних танкерів.

Об'єктом дослідження є процес інертизації вантажних танків нафтоналивного танкера.

Предметом дослідження - система генерації і подачі інертного газу в вантажні танки нафтоналивного танкера.

1.5 Характеристика методів дослідження дисертаційної роботи.

Для методологічного забезпечення дисертаційного дослідження була розроблена технологічна карта. Вона показана на рисунку 1.17. Приведена технологічна карта фактично є відтворенням способу вирішення головної задачі дисертаційної роботи використанням під час проведення досліджень.

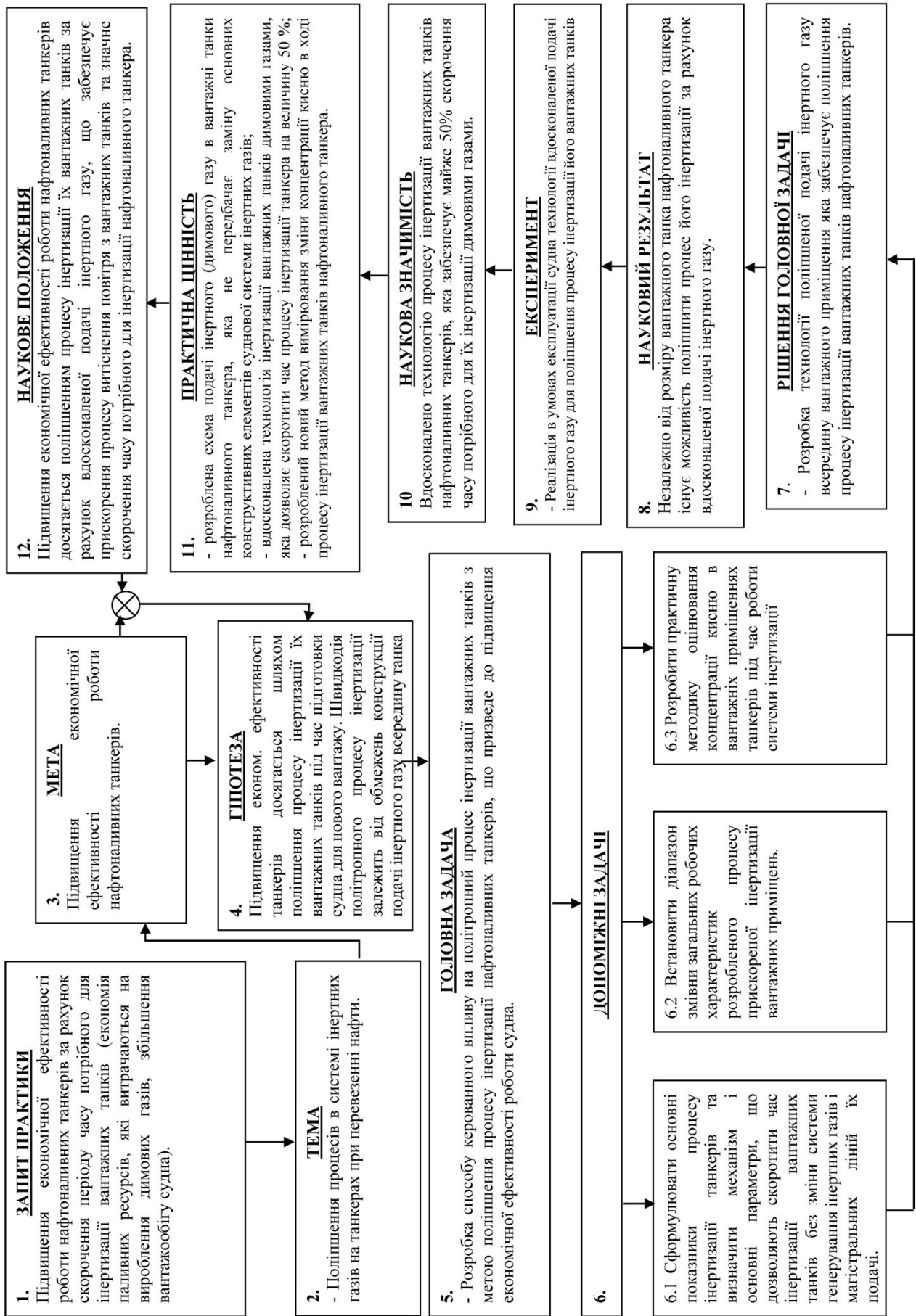


Рис.1.17 – Технологічна карта наукового дослідження

Цей спосіб базується на сукупному впровадженні під час досліджень двох методів - методу системного підходу та методу дедукції в комбінації з методологією забезпечення сучасними науковими даними дослідницького процесу.

Як це можливо побачити на технологічній карті запит практики в сьогоденному напрямку обумовлює необхідність у підвищенні рівня економічної ефективності експлуатації танкерів. Як результат таке підвищення обумовлює необхідність розробки поліпшення процесу проведення операцій інертизації танкера під час підготовки судна до транспортування нового вантажу.

Метою дисертаційних досліджень є підвищення економічної ефективності експлуатації танкера за рахунок вдосконалення технології для інертизації його вантажних танків димовими газами.

В якості наукової гіпотези дисертаційного дослідження на його початку було прийнято допущення про те, що підвищення економічної ефективності нафтоналивних танкерів може бути досягнуте за рахунок поліпшення процесу інертизації їх вантажних приміщень під час підготовки судна до транспортування нового вантажу, що призведе до скороченню часу потрібного для інертизації їх вантажних приміщень, і, як наслідок, економії паливних ресурсів, які витрачаються для вироблення димових газів, та збільшенню вантажообігу судна

Головна задача дисертаційного дослідження полягає в удосконаленні технології використання суднової системи інертних газів з метою поліпшення процесу інертизації вантажних танків нафтоналивного танкера, що призведе до підвищення економічної ефективності роботи судна.

Вирішення сформульованої головної задачі досліджень можливо отримати за рахунок використання відомої з методології наукових досліджень операції декомпозиції. Головна задача досліджень була розгалужена на набір допоміжних задач досліджень, які є не пов'язаними між

собою. Перелік допоміжних завдань досліджень підпорядковує до себе наступні три завдання:

1. Сформулювати основні показники процесу інертизації та визначити механізм і основні параметри, що дозволяють скоротити час інертизації вантажних танків без зміни системи вироблення інертних газів і магістральних ліній їх подачі.
2. Встановити діапазон зміни загальних робочих характеристик розробленого поліпшеного процесу інертизації вантажних танків нафтоналивного танкера.
3. Розробити практичну методику оцінювання концентрації кисню в вантажних танках нафтоналивних танкерів при роботі системи їх інертизації.

Формулювання першої задачі підпорядковує застосування під час її вирішення аналізу щодо головних чинників, які впливають на швидкість проведення процесу видалення кисню з вантажних танків нафтоналивного танкера за рахунок конвективно-дифузійних процесів. Головні показники повинні відображати процес переносу тепла та маси під час руху двофазної суміші повітря та інертного газу всередині вантажного танка судна.

Формулювання першої задачі також підпорядковує визначення головних показників процесу взаємодії між собою двох потоків – повітря та інертного газу під час їх примусового руху всередині простору з жорсткими стінками. Саме під час вирішення цієї задачі необхідно провести синергетичний аналіз відповідно до гіпотези про можливість скорочення часу процесу інертизації за рахунок використання вдосконаленої подачі інертного газу. Головним питанням, що має бути вирішене, є визначення механізму подачі інертного газу до всередину вантажного танка в рамках системи інертизації, що є вже задіяною на судні.

Формулювання другої задачі щодо встановлення діапазону зміни загальних робочих характеристик процесу поліпшеної інертизації вантажних танків нафтоналивного танкера вимагає розробки математичної моделі. Вона повинна містити систему диференціальних рівнянь тривимірного руху

двофазної суміші повітря і інертного газу в сукупності з початковими та граничними умовами. На підставі її використання за допомогою вирішення рівнянь, що описують процеси переносу тепла та маси можуть бути визначені діапазони зміни загальних робочих характеристик розробленого процесу поліпшеної інертизації вантажних танків нафтоналивного танкера.

Під час вирішення другої задачі з використанням даних натурального експерименту також можливо отримати основні показники, що відображають ефективність процесу поліпшеної інертизації вантажних танків танкера в порівнянні зі стандартною інертизацією. Використання порівняльного аналізу результатів вимірів та розрахунків однакових параметрів дозволить встановити головний показник - інтервал скорочення часу процесу інертизації вантажних танків.

Формулювання третьої задачі обумовлює розробку практичної методики монтажу датчиків та вимірювання температури і остаточної концентрації кисню всередині вантажних танків під час використання процесу поліпшеної інертизації.

Вирішення сформульованих вище трьох незалежних між собою допоміжних завдань дозволило отримати такі наукові результати:

- науковим результатом вирішення першої задачі є вдосконалена технологія інертизації вантажних танків нафтоналивного танкера для якої на підставі розробленої математичної моделі отримані результати, що відображають зміну та покращення якості процесу;
- науковим результатом вирішення другої задачі є встановлення чисельних діапазонів щодо зміни головних показників якості процесу інертизації танкера. Встановлено, що при ідентичних умовах роботи суднової системи інертизації, час процесу інертизації був скорочений на величину 50 %;
- науковим результатом вирішення третьої задачі є нова методика обробки даних, що дозволяє в режимі реального часу проводити аналіз поточного стану складу мікроатмосфери та технологічна схема дискретного вимірювання концентрації кисню всередині вантажного танка

нафтоналивного танкера, що використовує на відміну від вже відомих способів розташування створів та вимір концентрації кисню по всій висоті вантажного танка.

На початковому етапі досліджень була прийнята наукова гіпотеза про те, що скорочення часу та підвищення якості процесу інертизації на танкерах можливо досягнути за рахунок поліпшення процесів тепло- та масообміну. За рахунок отриманих теоретичних та суднових експериментальних результатів прийнята наукова гіпотеза отримала своє повноцінне та вірогідне підтвердження.

Практичне значення результатів дисертаційного дослідження визначається тим, що вони можуть бути впроваджені для вдосконалення систем подачі інертного газу на всіх нафтоналивних танкерах з метою підвищення економічної ефективності їх роботи, а також зменшення показників їх екологічного забруднення навколишнього середовища.

Результати дисертаційного дослідження також можуть бути використані в суднобудівній галузі і на всіх підприємствах з судноремонту. Вони можуть бути використані для технічного обладнання вантажних танків нафтоналивних танкерів системами надійного та швидкого зниження концентрації кисню, а також для модернізації або встановлення систем вимірювання показників процесу інертизації танкера. Також вони можуть бути застосовані в процесах навчання та/або підвищення кваліфікації суднових механіків.

Всі нові наукові результати, які було отримано під час виконання наукового дисертаційного дослідження визначають його наукове положення наступним чином: підвищення економічної ефективності роботи нафтоналивних танкерів досягається поліпшенням процесу інертизації їх вантажних танків за рахунок вдосконаленої подачі інертного газу, що забезпечує прискорення процесу витіснення повітря з вантажних танків та значне скорочення часу потрібного для інертизації нафтоналивного танкера.

1.6 Висновки по розділу 1

1. Основні принципи роботи системи інертних газів на нафтоналивних танкерах базуються на спалюванні дизельного палива або важкого палива в генераторі інертного газу. Продукти згоряння, що отримуються, після проведення ряду операцій по їх очищенню і зниженню температури, направляються в вантажні танки судна.

При заповненні вантажних танків інертний газ витісняє повітря, в результаті чого концентрація кисню знижується до значення 8 %. В цьому випадку мікроатмосфера всередині вантажного танка вважається інертною (пожеже- та вибухобезпечною). В даний час цей процес проводиться неефективно, він є паливовитратним і потребує значного часу для зниження концентрації кисню в вантажному танку до значення 8 %.

2. Система інертних газів на нафтоналивних танкерах є стандартною. Її конструктивне виконання відрізняється тільки в геометрії (відстанях між елементами, діаметрах труб, що використовуються і т.і.) компоновання основних вузлів і пристроїв та потужності генератора інертного газу. У більшості випадків такі системи містять однотипне обладнання та магістралі.

3. Найбільш часто, проблеми, що виникали на танкерах, визначаються такими технічними недоліками системи інертних газів як:

- погана сепарація важкого палива і, як наслідок, слабка фільтрація важких фракцій в паливі, яке спалюється, що виражається в змінах вироблених обсягів інертних газів в часі і зриву процесу згоряння в камері генератора інертних газів;

- неякісне спалювання палива в генераторі інертних газів, що виражається в підвищеному генеруванні сажі і занижених обсягах виробляемого газу;

- влучення незгорілих залишків палива в скруббер, в результаті чого відбувається забруднення морського середовища нафтопродуктами.

4. Аналіз причин аварій в системах інертних газів на нафтоналивних танкерах, показав, що найбільш часто проблеми, що виникають на судах, пов'язані з технічними недоліками системи інертизації. Їх усунення можливо виконати за рахунок модернізації системи підготовки палива та використання додакових механізмів збільшення швидкості процесу масообміну повітря і інертного газу у вантажному танці нафтоналивного танкера.

5. На підставі існуючих проблем інертизації вантажних танків на нафтоналивних танкерах була сформульована основна науково-технічна задача, яка полягає в поліпшенні процесу інертизації вантажних танків нафтоналивних танкерів, що буде забезпечувати істотне підвищення економічної ефективності судна за рахунок скорочення періоду часу інертизації для підготовки нафтоналивного судна до транспортування нового вантажу.

Для її вирішення сформульовано ряд допоміжних завдань.

РОЗДІЛ 2. АНАЛІЗ ТЕОРІЇ КОНВЕКТИВНО-ДИФУЗІЙНОГО ПЕРЕНЕСЕННЯ

2.1 Короткий огляд результатів теорії тепломасообміну в застосуванні до інертизації димовими газами вантажних танків нафтоналивного танкера

Сучасна теорія тепломасообміну базується на розгляді течій рідини або газу з урахуванням перенесення енергії і маси. Це перенесення відбувається в ході фізичних процесів природньої або примусової конвекції і дифузії [2, 12, 47, 58, 70, 80]. Всі співвідношення, що використовуються, в основному спрямовані на встановлення зв'язку між течією рідини в просторі, що розглядається, і механізмами, що лежать в основі теплопровідності, за рахунок якої і відбувається передача енергії від одних частинок даного середовища до інших [18, 55, 85, 90].

У більшості наукових робіт з теорії конвекції зазвичай розглядаються процеси тепломасопереносу в необмеженій області без присутності жорстких меж [51, 52, 54, 87]. Тільки невелика кількість робіт описує процес змішаної конвекції або дифузії газів в замкнутих просторах, коли стінки, що обмежують потік, справляють істотний нестационарний вплив на механізм процесу перенесення тепла або маси [18, 51, 72, 78, 83]. У цих роботах в основному розглядаються потоки всередині циліндричних труб або між плоскими вертикальними і горизонтальними стінками з різною температурою, що для вирішення проблеми інертизації вантажних танків нафтоналивного танкера зі складною формою поперечного перерізу не підходить.

В теорії тепломасообміну прийнято використання двох видів конвекції - природньої, коли процеси передачі маси і тепла є нерозривними і вимушеної, коли поле течії, що виникає, визначається не механізмами теплопередачі, а гідродинамікою потоків, що виникають [18]. У першому випадку велике

значення має оцінка кінетичної енергії, яку інертні гази передають потоку повітря під час його витискування з вантажного танка.

Якщо густина навколишнього середовища дорівнює ρ_a , а густина інертних газів дорівнює ρ то оцінка енергії, що передана від інертних газів має вигляд [18]

$$\frac{\rho V_z^2}{2} \approx gz(\rho_a - \rho) . \quad (2.1)$$

У випадку природньої конвекції ця оцінка являє собою інтерес з точки зору оцінки максимального чисельного значення швидкості витіснення повітря з вантажного танка судна V_z .

У застосуванні до інертизації вантажного танка димовими газами найбільш близькими є результати роботи [64] де розглянута теплова конвекція в тривимірному прямокутному просторі з відкритим верхом. Експеримент проводився в діапазоні чисел Релея від 10^2 до 10^8 . Для випадку передачі тепла від однієї нагрітої стінки до іншої були отримані безрозмірні профілі температури і швидкості. Вони показані на рисунку 2.1. В ході експериментів [64] було встановлено, що:

- при числах Релея $Ra < 10^3$ в прямокутному просторі виникає один осередок зі слабкою стаціонарною циркуляцією. Рідина, нагріта у стінки, підіймалася вгору, а потім опускалася вниз близько до холодної стінки. По ширині всього обсягу течія була направлена тільки вертикально (виключаючи повороти поблизу верхньої і нижньої меж);

- при числах Релея $10^3 < Ra < 10^5$ градієнт температури поблизу стінок зростає, а у внутрішній області течії залишався постійним. Розподіл температури для цього режиму показано на рисунку 2.1.

- розподіл швидкості, що показаний на рисунку 2.1 в діапазоні чисел Релея від $3 \cdot 10^4$ до $3,6 \cdot 10^6$ характеризується симетричністю щодо вертикальної віссі симетрії розглянутого простору. Зростання числа Релея свідчить про

просторове збільшення по ширині зони ядра потоку з невеликими значеннями швидкості локалізації кінцевої області течії з високими значеннями швидкості потоку поблизу жорстких вертикальних стінок.

У роботах [18, 63, 64] в якості нижньої межі виникнення вторинних течій в замкненому прямокутному просторі приводяться різні числа Релея. Загальний діапазон розкиду отриманих значень становить від $Ra=2,1 \cdot 10^5$ до $Ra=3,9 \cdot 10^5$. Більш складні структури потоку виникають згідно з даними роботи [64] при числах Релея $Ra > 10^6$. У цьому випадку спостерігається виникнення багатоосередкових структур зі слабкими зсувними течіями на їх межах.

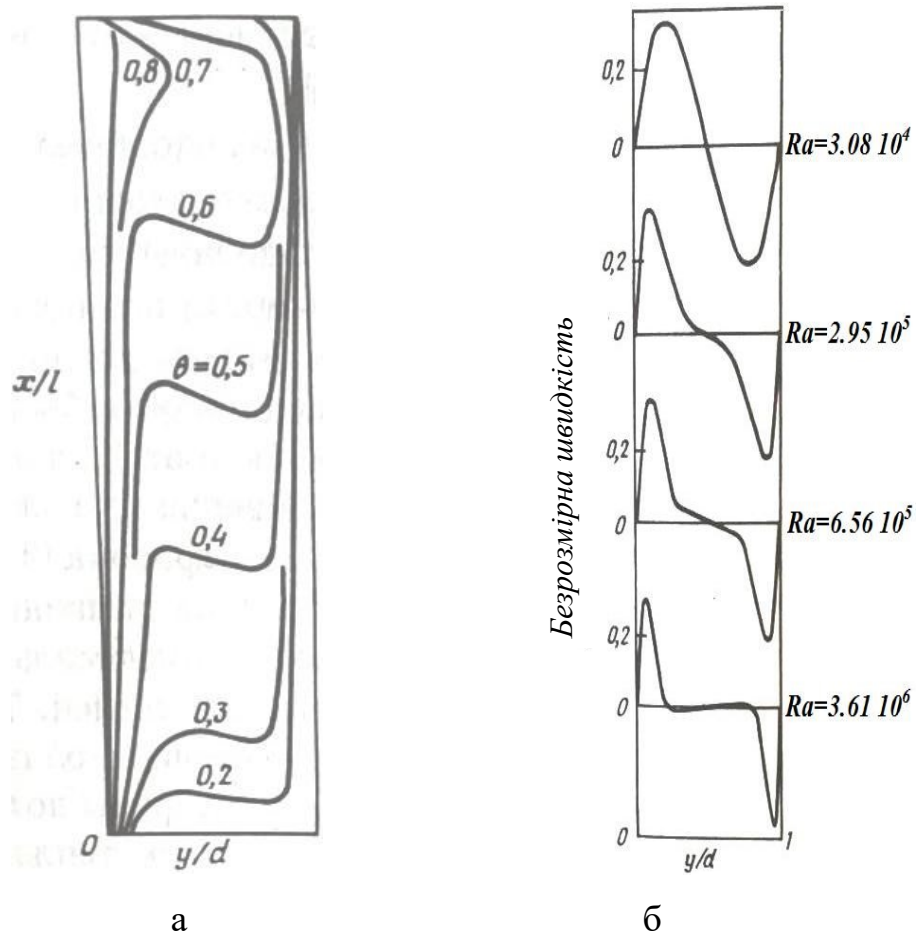


Рисунок 2.1 – Розподіл безрозмірних профілів температури і швидкості в прямокутному замкнутому просторі [64]:

- а - розподіл ізотерм, що описують поле температур по висоті простору;
- б - зміна поля ізотерм по ширині простору при різних числах Релея.

2.2 Основні характеристики процесу тепломасопереносу в полі сили тяжіння в застосуванні до інертизації димовими газами суднових вантажних танків

З точки зору підвищення якості процесу інертизації вантажних танків нафтоналивного танкера перед прийомом нового вантажу основними робочими показниками процесу тепломасопереносу інертного газу і повітря всередині вантажного танка можуть розглядатися наступні:

- поточна густина суміші інертного газу і повітря всередині вантажного танка;
- поле швидкості всередині вантажного танка;
- поле тиску всередині вантажного танка;
- розподіл температури суміші інертного газу і повітря по висоті вантажного танка;
- поточна концентрація кисню всередині вантажного танка;
- тривалість процесу витіснення повітря з усіх вантажних танків танкера.

З огляду на складності теоретичного опису процесу конвективно-дифузійного переносу інертних газів в суднових вантажних танках необхідно використовувати ряд припущень. В цьому випадку необхідно приймати такі припущення:

- рух повітря і інертного газу всередині вантажного танка танкера можна розглядати як рух потоку всередині плоского каналу з паралельними стінками;
- під час процесу термогравітаційної конвекції всі коефіцієнти переносу є постійними і не є залежними від температури [14];
- через невисокі швидкості руху всередині вантажного танка танкера ефекти стисливості не виявляються, а отже, витрату повітря на виході з вантажного танка можна приймати такою, що дорівнює витраті інертного газу, який подається в його середину.

Зміна густини суміші повітря і інертного газу в суднових вантажних танках за рахунок їх теплового розширення може бути врахована за допомогою сили Архімеда. Цю силу можна записати у вигляді

$$F_a = \Delta \rho g = (\rho - \rho_\infty)g, \quad (2.2)$$

де F_a - архімедова сила, Н; ρ - густина середовища в судновому вантажному танку, кг/м³; ρ_∞ - густина повітря за межами суднового вантажного танка (в атмосфері), кг/м³; g - гравітаційна стала, м/с².

У загальному випадку при розгляді термогравітаційної конвекції рівняння, що описує зміну густини суміші інертного газу і повітря всередині вантажного танка танкера може бути записано у вигляді [2, 14, 41]

$$d\rho = \left(\frac{\partial \rho}{\partial T} \right)_P dT + \left(\frac{\partial \rho}{\partial P} \right)_T dP, \quad (2.3)$$

де ρ - густина інертного газу, кг/м³; t - час, с; V - швидкість, м/с; P - тиск, Па; η - динамічна в'язкість, Па·с; g - прискорення вільного падіння м/с².

Рівняння (2.3) має бути доповнене рівнянням, що описує зміну температури інертного газу при термогравітаційній конвекції у вигляді

$$\frac{\partial T}{\partial t} + (\vec{V} \nabla) T = \frac{k}{\rho C_p} \nabla^2 T, \quad (2.4)$$

де k - коефіцієнт теплопровідності, Вт/(мК); C_p - теплоємність інертного газу при постійному тиску, Дж/К.

Відповідно до рекомендацій роботи [18] в першому наближенні розподіл температури між стінками по ширині і висоті вантажного танка можна приймати таким, що описується лінійним законом. Граничними значеннями в

цьому випадку повинні виступати температура інертного газу, що подається в вантажний танк танкера і повітря, яке знаходиться в ньому.

Частковим підтвердженням цієї гіпотези можуть виступати результати, описані в попередньому розділі, де на рисунку 2.1 видно, що відстань по вертикалі між ізотермами залишається весь час постійною, а самі ізотерми є горизонтальними практично по всій ширині даній області.

Для характеристики стійкості руху повітря в вантажному танці під час подачі струменів інертного газу необхідно використовувати безрозмірний критерій Річардсона

$$Ri = \frac{g \left(\frac{\partial \rho}{\partial z} \right)}{\rho \left(\frac{\partial V_z}{\partial z} \right)^2} . \quad (2.5)$$

У виразі (2.5) координата z відповідає вертикалі суднового вантажного танка. Початкова точка її відліку повинна відповідати лінії сполучення верхньої межі суднового вантажного танка з атмосферою.

При ламінарному висхідному (з лінійним профілем швидкості) русі повітря у вантажному танці нафтоналивного танкеру за рахунок подачі інертного газу при безперервному розподілі густини стійкість течії буде присутньою, при задоволенні нерівності $Ri > 0,25$ [18].

З теоретичної точки зору в рамках моделі суцільного середовища з масштабами $l \gg \lambda$, де λ довжина вільного пробігу молекул, рух інертного газу в судновому вантажному танці повинен розглядатися, як суцільний. В цьому випадку у всій області вантажного танка танкеру потік повітря і інертного газу, що рухається, ніде не зазнає розрив і при моделюванні може бути описаний рівнянням нерозривності (2.6) і рівняннями, що описують вільну конвекцію, коли рух виникає за рахунок дії сили Архімеда (різниці густини повітря і густини інертних газів) в поле дії масових сил

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho \vec{V}) = 0. \quad (2.6)$$

Процес витискання повітря за рахунок подачі інертного газу буде призводити до турбулентного режиму його руху. У першому наближенні епюру розподілу швидкості по вертикальному перетину вантажного танка танкера при такому русі можна відповідно до роботи [40] записати в наступному вигляді

$$v = 5.75 \lg \frac{y \sqrt{\frac{\tau}{\rho}}}{\nu} + 5.5, \quad (2.7)$$

де v - швидкість, м/с; y - поточна координата поперечного перерізу вантажного танка, м; τ - напруження тертя на стінці, Па; ρ - густина потоку, кг/м³; ν - кінематична в'язкість потоку, м/с².

Відповідно до рекомендацій роботи [18] величина напруги тертя τ , що входить в рівняння (2.7) може бути розрахована з урахуванням максимальної швидкості (яка визначається з поточної витрати інертного газу) по емпіричному виразу виду

$$\tau = 0,0225 \rho \left(v_{\max} \left[\frac{y}{\frac{1}{2}H} \right]^{\frac{1}{7}} \right)^{\frac{1}{4}} \left(v_{\max} \left[\frac{y}{\frac{1}{2}H} \right]^{\frac{1}{7}} \right)^{\frac{7}{4}} y^{-\frac{1}{4}}, \quad (2.8)$$

де $v_{\max}$ - максимальна швидкість руху повітря, м/с; H - ширина поперечного перерізу вантажного танка, м.

Тривалість процесу витискання повітря з вантажних танків судна безпосередньо визначається такими параметрами, як: швидкість подачі

струменів інертного газу і число Прандтля Pr . Чим вище їх чисельні значення, тим сильніше буде протікати конвективний перенос, а також зростатиме архімедова сила і величина ежекції повітря уздовж осі дії струменя інертного газу [14].

Оцінка тепловіддачі від інертного газу до висхідному потоку повітря може бути виконана за емпіричними виразами роботи [18]:

$$\text{при } 2 \cdot 10^4 < Gr < 2 \cdot 10^5 \quad Nu = 0.18 Gr^{\frac{1}{4}} \left(\frac{L}{d} \right)^{-\frac{1}{9}}, \quad (2.9)$$

$$\text{при } 2 \cdot 10^5 < Gr < 10^7 \quad Nu = 0.065 Gr^{\frac{1}{3}} \left(\frac{L}{d} \right)^{-\frac{1}{9}}. \quad (2.10)$$

Вирази (2.9)-(2.10) відповідають діапазону відстаней між стінками вантажного танка L/H від 1 до 40. При їх використанні слід враховувати, що при $Gr > 5 \cdot 10^4$ залежність процесу тепловіддачі від ширини потоку H між вертикальними стінками зводиться до нуля.

2.3 Математична модель процесу інертизації димовими газами вантажного танка нафтоналивного танкера

При розробці математичної моделі в силу невисоких швидкостей руху потоку повітря всередині вантажного танка була використана гіпотеза про його нестисливість. Також було прийнято, що сам процес руху повітряного потоку є рівноважним. У цьому випадку згідно з результатами досліджень роботи [14] динамічна задача про рух повітря під час його витиснення з вантажного приміщення може розглядатися окремо від теплової, коли всередині танка відбувається теплообмін між повітрям і інертним газом.

В якості основних рівнянь, що були прийняті для подальшого використання в теоретичних дослідженнях, були використані рівняння руху і рівняння масообміну. Вони описують зміну масової концентрації інертного газу і повітря в замкненому просторі вантажного танка танкера.

Ізоентропичний рух повітря у вантажному танкі танкера можливо описувати двома способами. Перша система рівнянь є менш точною, але проста в отриманні свого рішення з використанням чисельних математичних методів [41]

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial \rho V_x}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} (P + \rho V_x^2) &= 0 \\ \frac{\partial \rho V_y}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial y} (P + \rho V_y^2) &= 0 \\ \frac{\partial \rho V_z}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial z} (P + \rho V_z^2) &= 0 \\ \frac{P}{\rho^\gamma} &= const \end{aligned} \right\} . \quad (2.11)$$

Друга система рівнянь є більш точною, оскільки враховує характер руху потоку з урахуванням поточної концентрації інертного газу [18]. У тензорній формі записи вона має вигляд

$$\rho \frac{dV_i}{dt} = g \left(\frac{\partial \rho}{\partial C_i} \right) (C_i - C'_i) - \nabla P + \mu \nabla^2 V_i , \quad (2.12)$$

де V_x, V_y, V_z, V_i - проекція відповідної компоненти швидкості, м/с; P - тиск, Па; C_i, C'_i - концентрація повітря у вантажному танкі танкера і в навколишньому середовищі, кг/м³; μ - динамічна в'язкість повітря, Па·с.

Система рівнянь (2.12) є перевизначеною і для замикання повинна бути доповнена рівнянням нерозривності

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho V_x}{\partial x} + \frac{\partial \rho V_y}{\partial y} + \frac{\partial \rho V_z}{\partial z} = 0 . \quad (2.13)$$

Оскільки при подачі інертного газу в вантажні танки танкерів використовуються швидкості до 40 м/с ефекти стисливості газо-повітряного середовища всередині вантажного танка можна не враховувати [29, 52, 84]. З цієї причини з метою скорочення часу обчислень в рівнянні (2.13) перший доданок можна не враховувати і приймати, що він дорівнює нулю.

Зв'язок між густиною і температурою димових газів або повітря описується рівнянням стану [41, 65, 75]

$$\rho = \rho_0 (1 - C_w [T - T_0]) , \quad (2.14)$$

де C_w - об'ємний коефіцієнт теплового розширення, $^{\circ}\text{C}^{-1}$; ρ_0 , T_0 - початкові значення густини і температури, $\text{кг}/\text{м}^3$, $^{\circ}\text{C}$.

Рух струменів інертного газу в області виходу з соплових насадок (в перших п'яти розрахункових перетинах) всередині вантажного танка може бути описано за допомогою системи диференціальних рівнянь Ейлера

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial V_x}{\partial x} &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} \\ \frac{\partial V_y}{\partial y} &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial y} \\ \frac{\partial V_z}{\partial z} &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial z} \end{aligned} \right\} . \quad (2.15)$$

Спрощення обчислювального процесу за рахунок використання системи рівнянь (2.15) базується на експериментально встановленому результаті про відсутність впливу пов'язаних із в'язкістю ефектів на характер руху потоку в початковій ділянці струменя [5, 29, 43, 45].

Зміна концентрації інертного газу всередині вантажного танка в ході процесу інертизації можна описувати рівнянням, що зв'язує дифузний потік із градієнтом концентрації, що його спричиняє [18]

$$\frac{dC_i}{dt} = D_i \nabla^2 C_i + S_i, \quad (2.16)$$

де C_i - масова густина інертного газу в обсязі повітря, кг/м³; D_i - коефіцієнт дифузії інертного газу, м²/с; S_i - швидкість генерування (подачі) інертного газу в одиниці об'єму танка, м/с.

У загальному випадку розподіл поля температури всередині вантажного танка нафтоналивного танкера при вирішенні задачі про його інертизацію не є суттєвим. Діапазон зміни температури інертного газу в реальному процесі інертизації вантажного танка в залежності від кліматичних умов району плавання судна складає не більше 10 - 20 °С, а реальне витискування повітря за допомогою інертного газу відбувається за рахунок процесів конвективного переносу, а не теплової дифузії. З цієї причини в першому наближенні поле температур може бути оцінено за допомогою вже відомого рішення сферичної теплової задачі з точковим джерелом тепла. Згідно роботи [14] за межами кола радіусом r , на якому задана температура $T(r_0) = T_0$ розподіл поля температур при значенні числа Пекле (Pe) більше двох буде описуватися за допомогою рівняння

$$T(r) = \frac{q}{2(Pe - 2)} \frac{1}{r^2} + \left(T_0 - \frac{q}{2(Pe - 2)} \frac{1}{r_0^2} \right) \left(\frac{r}{r_0} \right)^{-Pe} + T_\infty, \quad (2.17)$$

де T - температура, °С; r - радіус сферичної поверхні, на якій визначається температура, м; q - інтенсивність тепловиділення, Вт; Pe - число Пекле; r_0 - радіус теплового сферичного джерела на якому задана температура, м; T_∞ - температура на нескінченності, °С.

Величини Pe і q можуть бути розраховані за виразами

$$Pe = - \frac{Q}{2\pi\chi}, \quad (2.18)$$

$$q = \frac{4\nu\chi Pe^2}{c_v}, \quad (2.19)$$

де Q - витрата інертного газу, $\text{м}^3/\text{с}$; χ - температуропровідність $\text{м}^2/\text{с}$; ν – кінематична в'язкість, $\text{м}^2/\text{с}$; C_v - питома теплоємність, $\text{Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$.

Рівняння (2.11) - (2.19) є математичною моделлю процесу інертизації вантажного танка нафтоналивного танкера в ході його підготовки до наступних вантажних операцій.

Для вирішення рівнянь математичної моделі використовувалися початкові умови. Вони моделювали стан потоку повітря всередині всього простору вантажного танка і струменів інертного газу, що подаються на його витиснення.

При формулюванні кінематичних характеристик струменів інертного газу, що подаються в вантажний танк через соплові насадки було прийнято, що вони характеризуються ідентичними значеннями швидкості, тиску та температури у всіх розрахункових вузлах. Ці умови в залежності від місця розташування насадок подачі струменів інертного газу протягом усього обчислювального процесу необхідно формулювати в наступному вигляді:

- розташування насадок на подволоку вантажного танка

$$V_z = -const, \quad V_x = 0, \quad V_y = 0, \quad (2.20)$$

$$P = const, \quad (2.21)$$

$$T = const. \quad (2.22)$$

- розташування насадок на днищі вантажного танка

$$V_z = const, \quad V_x = 0, \quad V_y = 0, \quad (2.23)$$

$$P = const, \quad (2.24)$$

$$T = const. \quad (2.25)$$

Значення констант, які входять до виразів (2.20) - (2.25) повинні відповідати характеристикам нагнітального обладнання, що використовується для подачі інертного газу на танкерах. При проведенні теоретичних досліджень вони вибиралися з наступного діапазону значень:

- швидкість подачі струменів інертного газу в вантажний танк від 1 до 4 м/с;
- тиск струменів інертного газу на виході з сопла від 0,11 до 0,12 МПа;
- температура струменів інертного газу на виході з сопла від 30 до 65 °С.

У виразах (2.20) і (2.23) по відношенню до основного напрямку руху повітря, що витискається знак швидкості приймається позитивним (в разі збігу напрямків) або негативним (в разі протилежної спрямованості). Як показано в наступному підрозділі на рисунку 2.2 його відлік ведеться завжди від днища вантажного танка в сторону атмосфери.

Початкові умови для моделювання повітря всередині танка записувалися у вигляді стану його повного спокою перед початком подачі струменів інертного газу. Для цього в ході розрахунків використовувалися наступні умови:

$$V_x = 0, \quad V_y = 0, \quad V_z = 0, \quad (2.26)$$

$$P = -g\rho_0 \left(y - \frac{C_w}{2H} T_0 y^2 \right), \quad (2.27)$$

$$T = const. \quad (2.28)$$

Як видно з рівняння (2.27) зміна тиску по висоті вантажного танка відповідає гідростатичному тиску. Це рівняння взято з роботи [41].

У разі, якщо в ході моделювання для отримання результатів з високою вірогідністю необхідно враховувати кут качки судна γ , то в рівнянні (2.27) необхідно замінити доданок g на:

- $g \cos \gamma$ в напрямку віссі ОХ;
- $g \sin \gamma$ в напрямку віссі ОУ.

Значення констант входять до виразу (2.26) - (2.28) повинні відповідати характеристикам повітря всередині вантажного танка в реальних умовах експлуатації танкера. При проведенні численних досліджень вони вибиралися з наступного діапазону значень:

- тиск повітря у вантажному танку відповідає атмосферному тиску і може змінюватися в межах 5% від 0,101 до 0,106 МПа;
- температура повітря всередині вантажного танка в межах від 20 до 30 °С.

Для вирішення рівнянь математичної моделі в сукупності з початковими умовами використовувалися також і граничні умови. Вони моделювали все жорсткі поверхні розрахункового обсягу вантажного танка нафтоналивного танкера і характеристики струменів інертного газу в місцях розташування їх подачі.

Граничні умови, що описують жорсткі перегородки вантажного танка задавалися у вигляді умови непроточності поверхні. В цьому випадку швидкість потоку на жорстких перегородках дорівнює нулю

$$V_x = 0, \quad V_y = 0, \quad V_z = 0. \quad (2.29)$$

У розрахункових вузлах, які відповідають соплам подачі струменів інертного газу, використовувалися співвідношення (2.20) або (2.23). Вибір отриманого значення між цими співвідношеннями визначався тільки місцем розташування сопел подачі інертного газу (верхній подволок або днище вантажного танка).

Чисельне значення величини температури на перегородках вантажного танка також задавалося в розрахунках незмінним. Під час проведення чисельних експериментів її величина завжди приймалася відповідно до співвідношення (2.28) такою, що дорівнює початковому значенню температури повітря в вантажному танку судна перед початком процесу інертизації.

2.4 Опис чисельної схеми вирішення завдання про інертизацію димовими газами вантажного танка нафтоналивного танкера

З огляду на складність модельованого процесу витиснення повітря з вантажних танків нафтоналивного танкера за допомогою інертного газу особливу увагу було приділено способу дискретизації розрахункової області задачі, що розв'язується.

При дискретному описі суцільного середовища під час реалізації чисельного рішення завжди губляться точні кількісні показники процесу, що моделюється [2, 5, 50]. З цієї причини при розробці обчислювальної схеми побудова розрахункової сітки проводилася таким чином, щоб встановити всі якісні особливості процесу та отримати найбільше кількісне наближення до реальних умов. В цьому випадку необхідно проводити згущення розрахункових вузлів до меж, що моделюють жорсткі перегородки суднового вантажного танка.

При розстановці розрахункових вузлів в області, яка відтворює простір суднового вантажного танка і використанні кінцево-різницевого методу дискретизації доданків математичної моделі використовувався наступний алгоритм:

1. У міру віддалення від меж, що моделюють жорсткі перегородки вантажного танка нафтоналивного танкера, зміну кроку між розрахунковими вузлами необхідно виконувати за законами:

$$\Delta x_i = 2 \left(1 - \frac{i}{\frac{1}{2}N} \right) \text{ або } \Delta x_i = 2 \left(\frac{i}{\frac{1}{2}N} - 1 \right); \quad (2.30)$$

$$\Delta y_i = 2 \left(1 - \frac{j}{\frac{1}{2}M} \right) \text{ або } \Delta y_i = 2 \left(\frac{j}{\frac{1}{2}M} - 1 \right); \quad (2.31)$$

$$\Delta z_i = 2 \left(1 - \frac{k}{\frac{1}{2}K} \right) \text{ або } \Delta z_i = 2 \left(\frac{k}{\frac{1}{2}K} - 1 \right); \quad (2.32)$$

де N, M, K - число розрахункових вузлів по ширині, довжині і висоті суднового вантажного танка, шт.; i, j, k - поточний розрахунковий індекс.

Загальна схема розташування розрахункових вузлів, яка була розроблена для проведення чисельних експериментів, показана на рисунку 2.2. На ньому у вигляді куба відображена тільки четверта частина розрахункової області, що моделює вантажне приміщення танкера. Як видно на розрахунковій схемі у напрямку від стінок танка в сторону трьох вісей його симетрії виконувалось збільшення кроку між розрахунковими вузлами. Така розстановка розрахункових вузлів здійснювалася за трьома напрямками одночасно.

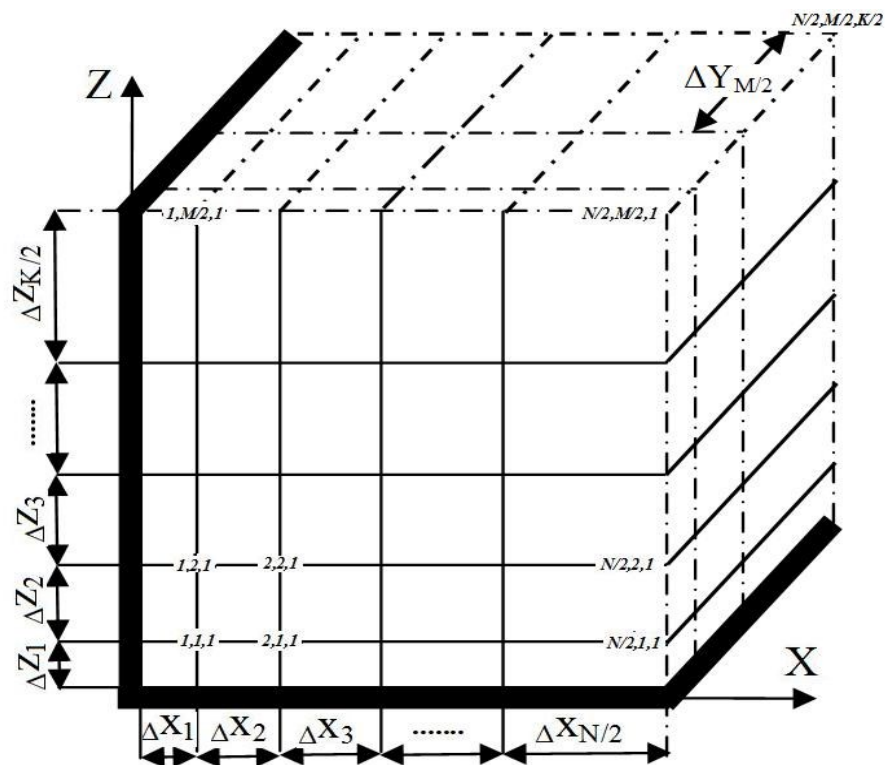


Рисунок 2.2 – Розрахункова схема

2. Розташування розрахункових вузлів, відповідних місцям подачі струменів інертного газу всередину вантажного танка нафтоналивного танкера, моделювався точками, які були розташовані на його нижній межі. Їх

розташування в горизонтальній площині вантажного танка здійснювалася за лінійним законом:

$$x_i = x_{i-1} + \Delta x_i = x_{i-1} + \frac{L}{4}, \quad (2.33)$$

$$y_j = y_{j-1} + \Delta y_j = y_{j-1} + \frac{H}{4}, \quad (2.34)$$

$$Z_k = 0, \quad (2.35)$$

де L і H – ширина та довжина вантажного танка, м.

3. Дискретизація всіх доданків, що входять в систему рівнянь математичної моделі проводилася в залежності від місця розташування розрахункового вузла за допомогою методу кінцевих різниць. Реалізація цього методу передбачає, що кожний доданок у вигляді похідної від параметру, може бути записано за допомогою лівосторонніх, правобічних і центральних різниць [2, 77].

Загальна схема розстановки розрахункових вузлів при використанні цих різниць показана на схематичному рисунку 2.3.

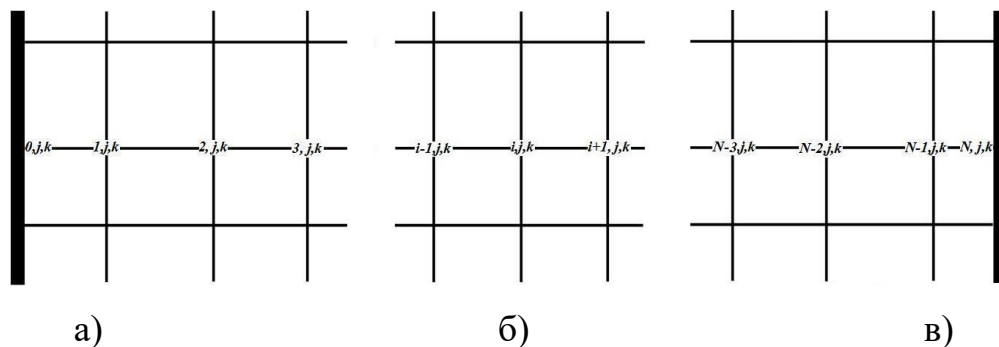


Рисунок 2.3 – Розрахункова схема

тип різниць: а - правосторонні; б - центральні; в - лівосторонні.

В якості прикладу, для всіх розрахункових співвідношень, сформульованих для похідних першого і другого порядку використана

величина тиску Р в напрямку віссі ОХ. Вони, відповідно до роботи [2], записувалися у вигляді:

- трьохточкова апроксимація лівосторонніми різницями

$$\frac{\partial P_{N,j,k}^n}{\partial x} = \frac{3P_{N,j,k}^{n-1} - 4P_{N-1,j,k}^{n-1} + P_{N-2,j,k}^{n-1}}{(x_N - x_{N-1}) + (x_{N-1} - x_{N-2})} ; \quad (2.36)$$

$$\frac{\partial^2 P_{i,j}^n}{\partial x^2} = \frac{2P_{N,j,k}^{n-1} - 5P_{N-1,j,k}^{n-1} + 4P_{N-2,j,k}^{n-1} - P_{N-3,j,k}^{n-1}}{(x_N - x_{N-1})(x_{N-2} - x_{N-3})} ; \quad (2.37)$$

- трьохточкова апроксимація центральними різницями

$$\frac{\partial P_{i,j,k}^n}{\partial x} = \frac{P_{i+1,j,k}^{n-1} - P_{i-1,j,k}^{n-1}}{(x_{i+1} - x_i) + (x_i - x_{i-1})} ; \quad (2.38)$$

$$\frac{\partial^2 P_{i,j}^n}{\partial x^2} = \frac{P_{i+1,j}^{n-1} - 2P_{i,j}^{n-1} + P_{i-1,j}^{n-1}}{(x_{i+1} - x_i)(x_i - x_{i-1})} ; \quad (2.39)$$

- трьохточкова апроксимація правосторонніми різницями

$$\frac{\partial P_{0,j,k}^n}{\partial x} = \frac{-3P_{0,j,k}^{n-1} + 4P_{1,j,k}^{n-1} - P_{2,j,k}^{n-1}}{(x_{i+2} - x_{i+1}) + (x_{i+1} - x_i)} ; \quad (2.40)$$

$$\frac{\partial^2 P_{0,j,k}^n}{\partial x^2} = \frac{-P_{3,j}^{n-1} + 4P_{2,j,k}^{n-1} - 5P_{1,j,k}^{n-1} + 2P_{0,j,k}^{n-1}}{(x_{i+3} - x_{i+2})(x_{i+1} - x_i)} . \quad (2.41)$$

Аналогічні співвідношення використовувалися під час дискретизації похідних і в напрямку вісsey ОУ і ОZ.

4. Дискретизація нестационарних доданків, що містять похідну за часом, проводилася з другим порядком вірогідності за виразом, що запропонований в роботі [41]

$$\frac{\partial P}{\partial t} = \frac{1}{\Delta t} \left(\frac{3}{2} P_{i,j,k}^{n+1} - 2P_{i,j,k}^n + \frac{1}{2} P_{i,j,k}^{n-1} \right). \quad (2.41)$$

Вираз (2.41) має на увазі використання в ході розрахунків чисельних даних з трьох тимчасових рівнів - невідомого $n + 1$, а також двох відомих: n і $n-1$. З цієї причини в ході початку обчислень всі складові, що входять до виразів (2.14) - (2.22) повинні формулюватися для двох перших початкових моментів часу. Значення величини розрахункового кроку за часом необхідно ставити таким, що дорівнює величині не більше $\Delta t = 0,01$ с.

За допомогою виразів (2.36) - (2.41) була записана явна кінцево-різницева чисельна схема рішення рівнянь математичної моделі (2.11) - (2.16). Вона мала другий порядок вірогідності і в залежності від способу дискретизації для розрахункового вузла з координатами i, j, k була записана в трьох видах апроксимації. Як приклад, нижче наведено запис рівняння (2.12) і рівняння (2.16).

Дискретне рівняння для визначення зміни величини концентрації інертного газу у вантажному танку нафтоналивного танкера в часі:

- лівобічні різниці:

$$\begin{aligned} C_{i,j,k}^{n+1} = & \frac{1}{3} \left[2\Delta t D \left(\frac{2C_{i,j,k}^n - 5C_{i-1,j,k}^n + 4C_{i-2,j,k}^n - C_{i-3,j,k}^n}{(X_i - X_{i-1})(X_{i-2} - X_{i-3})} + \right. \right. \\ & + \frac{2C_{i,j,k}^n - 5C_{i,j-1,k}^n + 4C_{i,j-2,k}^n - C_{i,j-3,k}^n}{(Y_j - Y_{j-1})(Y_{j-2} - Y_{j-3})} + \frac{2C_{i,j,k}^n - 5C_{i,j,k-1}^n + 4C_{i,j,k-2}^n - C_{i,j,k-3}^n}{(Z_k - Z_{k-1})(Z_{k-2} - Z_{k-3})} \Big) + \\ & \left. + 2\Delta t S + 4C_{i,j,k}^n - C_{i,j,k}^{n-1} \right] \end{aligned} \quad (2.42)$$

- правобічні різниці:

$$\begin{aligned} C_{i,j,k}^{n+1} = & \frac{1}{3} \left[2\Delta t D \left(\frac{-C_{i+3,j,k}^n + 4C_{i+2,j,k}^n - 5C_{i+1,j,k}^n + 2C_{i,j,k}^n}{(X_{i+3} - X_{i+2})(X_{i+1} - X_i)} + \right. \right. \\ & + \frac{-C_{i,j+3,k}^n + 4C_{i,j+2,k}^n - 5C_{i,j+1,k}^n + 2C_{i,j,k}^n}{(Y_{j+3} - Y_{j+2})(Y_{j+1} - Y_j)} + \frac{-C_{i,j,k+3}^n + 4C_{i,j,k+2}^n - 5C_{i,j,k+1}^n + 2C_{i,j,k}^n}{(Z_{k+3} - Z_{k+2})(Z_{k+1} - Z_k)} \Big) + \\ & \left. + 2\Delta t S + 4C_{i,j,k}^n - C_{i,j,k}^{n-1} \right] \end{aligned} \quad (2.43)$$

– центральні різниці:

$$C_{i,j,k}^{n+1} = \frac{1}{3} \left[2\Delta t D \left(\frac{C_{i+1,j,k}^n - 2C_{i,j,k}^n + C_{i-1,j,k}^n}{(X_{i+1} - X_i)(X_i - X_{i-1})} + \frac{C_{i,j+1,k}^n - 2C_{i,j,k}^n + C_{i,j-1,k}^n}{(Y_{j+1} - Y_j)(Y_j - Y_{j-1})} + \right. \right. \\ \left. \left. + \frac{C_{i,j,k+1}^n - 2C_{i,j,k}^n + C_{i,j,k-1}^n}{(Z_{k+1} - Z_k)(Z_k - Z_{k-1})} \right) + 2\Delta t S + 4C_{i,j,k}^n - C_{i,j,k}^{n-1} \right] \quad (2.44)$$

Після визначення величини концентрації інертного газу у вантажному танку нафтоналивногого танкера на новому часовому рівні $n+1$ проводився перерахунок розміру швидкості потоку для цього часового рівня.

Для проекції вектору швидкості на напрямок віссі OZ, що збігається з рухом повітря від полу до виходу з вантажного танка три варіанти запису рівняння (2.12) в кінцево-різницевій формі мають вигляд:

- лівобічні різниці:

$$Vx_{i,j,k}^{n+1} = \frac{1}{3} \frac{\Delta t}{\rho_{i,j,k}^{n+1}} (4Vx_{i,j,k}^n - Vx_{i,j,k}^{n-1}) + \frac{2}{3} \frac{\Delta t}{\rho_{i,j,k}^{n+1}} \left[g \left(\frac{3\rho_{i,j,k}^{n+1} - 4\rho_{i-1,j,k}^{n+1} + \rho_{i-2,j,k}^{n+1}}{(C_{i,j,k}^{n+1} - C_{i-1,j,k}^{n+1}) + (C_{i-1,j,k}^{n+1} - C_{i-2,j,k}^{n+1})} \right) (C_{i,j,k}^{n+1} - C^A) - \right. \\ \left. - \frac{1}{3} \left(\frac{3P_{i,j,k}^{n+1} - 4P_{i-1,j,k}^{n+1} + P_{i-2,j,k}^{n+1}}{(X_i - X_{i-1}) + (X_{i-1} - X_{i-2})} \right) \right] + \frac{2\Delta t}{3} v \left[\frac{2Vx_{i,j,k}^n - 5Vx_{i-1,j,k}^n + 4Vx_{i-2,j,k}^n - Vx_{i-3,j,k}^n}{(X_i - X_{i-1})(X_{i-2} - X_{i-3})} + \right. \\ \left. + \frac{2Vx_{i,j,k}^n - 5Vx_{i,j-1,k}^n + 4Vx_{i,j-2,k}^n - Vx_{i,j-3,k}^n}{(Y_j - Y_{j-1})(Y_{j-2} - Y_{j-3})} + \frac{2Vx_{i,j,k}^n - 5Vx_{i,j,k-1}^n + 4Vx_{i,j,k-2}^n - Vx_{i,j,k-3}^n}{(Z_k - Z_{k-1})(Z_{k-2} - Z_{k-3})} \right]; \quad (2.45)$$

– правобічні різниці:

$$Vx_{i,j,k}^{n+1} = \frac{1}{3} \frac{\Delta t}{\rho_{i,j,k}^{n+1}} (4Vx_{i,j,k}^n - Vx_{i,j,k}^{n-1}) + \frac{2}{3} \frac{\Delta t}{\rho_{i,j,k}^{n+1}} \left[g \left(\frac{-3\rho_{i,j,k}^{n+1} + 4\rho_{i+1,j,k}^{n+1} - \rho_{i+2,j,k}^{n+1}}{(C_{i+2,j,k}^{n+1} - C_{i+1,j,k}^{n+1}) + (C_{i+1,j,k}^{n+1} - C_{i,j,k}^{n+1})} \right) (C_{i,j,k}^{n+1} - C^A) - \right. \\ \left. - \frac{1}{3} \left(\frac{-3P_{i,j,k}^{n+1} + 4P_{i+1,j,k}^{n+1} - P_{i+2,j,k}^{n+1}}{(X_{i+2} - X_{i+1}) + (X_{i+1} - X_i)} \right) \right] + \frac{2\Delta t}{3} v \left[\frac{-Vx_{i+3,j,k}^n + 4Vx_{i+2,j,k}^n - 5Vx_{i+1,j,k}^n + 2Vx_{i,j,k}^n}{(X_{i+3} - X_{i+2})(X_{i+1} - X_i)} + \right. \\ \left. + \frac{-Vx_{i,j+3,k}^n + 4Vx_{i,j+2,k}^n - 5Vx_{i,j+1,k}^n + 2Vx_{i,j,k}^n}{(Y_{j+3} - Y_{j+2})(Y_{j+1} - Y_j)} + \frac{-Vx_{i,j,k+3}^n + 4Vx_{i,j,k+2}^n - 5Vx_{i,j,k+1}^n + 2Vx_{i,j,k}^n}{(Z_{k+3} - Z_{k+2})(Z_{k+1} - Z_k)} \right]; \quad (2.46)$$

– центральні різниці:

$$\begin{aligned}
 Vx_{i,j,k}^{n+1} = & \frac{1}{3} \frac{\Delta t}{\rho_{i,j,k}^{n+1}} (4Vx_{i,j,k}^n - Vx_{i,j,k}^{n-1}) + \frac{2}{3} \frac{\Delta t}{\rho_{i,j,k}^{n+1}} \left[g \left(\frac{\rho_{i+1,j,k}^{n+1} - \rho_{i-1,j,k}^{n+1}}{(C_{i+1,j,k}^{n+1} - C_{i,j,k}^{n+1}) + (C_{i,j,k}^{n+1} - C_{i-1,j,k}^{n+1})} \right) (C_{i,j,k}^{n+1} - C^A) - \right. \\
 & \left. - \frac{1}{3} \left(\frac{P_{i+1,j,k}^{n+1} - P_{i-1,j,k}^{n+1}}{(X_{i+1} - X_i) + (X_i - X_{i-1})} \right) \right] + \frac{2\Delta t}{3} v \left[\frac{Vx_{i+1,j,k}^n - 2Vx_{i,j,k}^n + Vx_{i-1,j,k}^n}{(X_{i+1} - X_i)(X_i - X_{i-1})} + \right. \\
 & \left. + \frac{Vx_{i,j+1,k}^n - 2Vx_{i,j,k}^n + Vx_{i,j-1,k}^n}{(Y_{j+1} - Y_j)(Y_j - Y_{j-1})} + \frac{Vx_{i,j,k+1}^n - 2Vx_{i,j,k}^n + Vx_{i,j,k-1}^n}{(Z_{k+1} - Z_k)(Z_k - Z_{k-1})} \right];
 \end{aligned}
 \tag{2.47}$$

У чисельної реалізації було використано наступний порядок ітераційного вирішення системи рівнянь математичної моделі:

1. Глобальним змінним параметром, по якому проводилася ітераційна розрахункова процедура, був час. Всі обчислення проводилися з використанням трьох часових рівнів - двох відомих $n-1$ і n , а також одного невідомого $n+1$.

Крок за часом Δt на всіх часових рівнях задавався однаковим.

2. Спочатку використовувалося рівняння (2.16). При його вирішенні в кожному розрахунковому вузлі визначалися значення величини концентрації інертного газу в вантажному танку судна $C_{i,j,k}^{n+1}$ на новому часовому рівні $n+1$.

3. З використанням знайдених значень $C_{i,j,k}^{n+1}$ з першого рівняння, що входить в систему рівнянь (2.12) для нового часового рівня $n+1$ визначалися значення величини тиску $P_{i,j,k}^{n+1}$.

4. З урахуванням знайденої величини тиску $P_{i,j,k}^{n+1}$ за допомогою другого і третього рівняння з системи рівнянь (2.12) знаходилися нові значення проекцій швидкості $Vu_{i,j,k}^{n+1}$ і $Vz_{i,j,k}^{n+1}$ для часового рівня $n+1$.

5. З рівняння нерозривності (2.13) з урахуванням нових значень поздовжньої і вертикальної проекцій швидкості $Vu_{i,j,k}^{n+1}$ і $Vz_{i,j,k}^{n+1}$ розраховувалася проекція швидкості на поперечний напрямок $Vx_{i,j,k}^{n+1}$.

6. З використанням першого рівняння з системи (2.12) з урахуванням нових значень $Vx_{i,j,k}^{n+1}$, $Vy_{i,j,k}^{n+1}$, $Vz_{i,j,k}^{n+1}$ и $C_{i,j,k}^{n+1}$ виконувалося уточнення величини тиску $P_{i,j,k}^{n+1}$ в кожному розрахунковому вузлі.

7. При переході на новий часовий рівень з кроком Δt всі описані вище розрахункові процедури, повторювалися спочатку.

2.5 Висновки по розділу 2

1. У сучасній теорії тепломасообміну розглядаються течії рідини або газу з урахуванням перенесення енергії і маси в ході природної або примусової конвекції і дифузії. Всі використовувані співвідношення в основному спрямовані на встановлення зв'язку між перебігом рідини в розглянутому обсязі і механізмами, що лежать в основі теплопровідності, за рахунок якої і відбувається передача енергії від одних частинок даної середовища до інших.

2. У більшості наукових робіт інших авторів розглядаються процеси тепломасопереносу в необмеженій області без присутності жорстких кордонів. Тільки невелика кількість дослідних робіт описує процес змішаної конвекції або дифузії газів в замкнутих просторах, коли стінки, що обмежують потік, справляють істотний нестационарне вплив на механізм процесу перенесення тепла або маси.

3. Оцінка кінетичної енергії, яку інертний газ передає потоку повітря, при його витісненні з вантажного танка, дозволила отримати вираз, що описує величину максимального значення швидкості витіснення повітря з вантажного танка нафтоналивного танкера.

4. У першому наближенні розподіл температури між перегородками по ширині і висоті вантажного танка нафтоналивного танкера можна приймати таким, що підпорядковується лінійному закону.

5. Тривалість процесу витіснення повітря з вантажних танків нафтоналивного танкера безпосередньо визначається такими параметрами, як швидкість подачі струменів інертного газу і число Прандтля Pr . Чим вище їх значення, тим сильніше буде конвективний перенос, зростання сили Архімеда і величина ежекції повітря уздовж осі дії струменя інертного газу.

6. В силу невисоких швидкостей руху потоку повітря всередині вантажного танка процес його руху є рівноважним. В цьому випадку динамічна задача про рух повітря при його витісненні з танка може розглядатися окремо від теплової, коли всередині вантажного танка відбувається теплообмін між повітрям і інертним газом.

7. При розробці математичної моделі використані рівняння руху і рівняння масообміну, що описують зміну масової концентрації інертного газу і повітря в замкнутому просторі вантажного танка.

Для вирішення диференціальних рівнянь математичної моделі в сукупності з усіма сформульованими початковими і граничними умовами був використаний метод кінцевих різниць.

РОЗДІЛ 3. ТЕОРЕТИЧНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ЗАПОВНЕННЯ ІНЕРТНИМ ГАЗОМ СУДНОВИХ ВАНТАЖНИХ ТАНКІВ

3.1 Теоретичне дослідження процесу інертизації димовими газами вантажного танка нафтоналивного танкера

Використання кінцево-різницевого методу для розв'язання системи нестационарних диференціальних рівнянь завжди супроводжується проблемами, що пов'язані зі стійкістю обчислювального процесу і збіжності рішення [50, 65]. З цієї причини при проведенні всіх теоретичних розрахунків на основі методу кінцевих різниць для поточної перевірки якості результатів, що одержуються, було використано критерій стійкості обчислювального процесу. Цей критерій називають сітковим числом Рейнольдсу [2, 41].

Відповідно до даних роботи [41] можна вважати, що при вирішенні задачі щодо інертизації вантажного танка нафтоналивного танкера отримання коректних результатів буде виконуватися при задоволенні вимоги про рівність обох частин рівнянь (2.3)-(2.6) і (2.11)-(2.16). Стійкість обчислювального процесу в цьому випадку може бути описана нерівністю такого вигляду

$$Re_m = \frac{|V_{i,j,k}| \Delta L}{\nu} \leq 2, \quad (3.1)$$

де Re_m - сіткове число Рейнольдсу; $V_{i,j,k}$ - значення швидкості в розрахунковому вузлі з координатами i, j, k , м/с; ΔL - відстань між двома сусідніми розрахунковими вузлами в напрямку відповідної віссі координат, м; ν - кінематична в'язкість потоку, м/с².

Значення параметра Re_m (сіткового числа Рейнольдсу) в ході розрахунків в кожному розрахунковому вузлі визначалося три рази з використанням трьох різних значень величини ΔL . Залежно від напрямку розрахунку вони були відповідно рівними поточному значенню кроку розрахункової сітки у відповідному напрямку: Δx , Δy , Δz .

В якості характерного розміру при визначенні числа Рейнольдсу потоку приймалася висота вантажного танка нафтоналивного танкера. Подача інертного газу моделювалася конусним струменем, який витікає з центральної точки розрахункового перетину, що знаходиться відразу над днищем (нижньою межею розрахункової області) танка. У розрахунках кут розкриття конусної насадки для подачі інертного газу становив 30° , а довжина факелу струменя за допомогою граничних умов задавалася такою, що дорівнює п'яти відсоткам від висоти вантажного танка. Положення вихідного отвору відповідало величині, що становить 10% від ширини танка (в відносних одиницях $0,1x/L$).

Результати розподілу похибки (сіткового числа Рейнольдсу), по висоті простору вантажного танка, що моделювався, показані на рисунку 3.1. Наведені на графіку розрахункові дані відповідають остаточному стаціонарному вирішенню завдання про інертизацію танкера. На рис. 3.1 видно, що при проведенні розрахунків на підставі математичної моделі чисельне значення величини Re_m змінювалося в діапазоні від 0,001 до 1,7.

Великі значення сіткового числа Рейнольдсу ($Re_m > 1$) завжди знаходилися тільки в тій частині розрахункової області, яка відповідала простору поблизу жорстких границь вантажного танка, що моделюється (бічні перегородки, днище та подволок). Аналогічним чином великі значення критерію якості розрахунків були присутні в нижній частині вантажного танка, що моделюється. Вони відповідали локальній зоні, в якій за допомогою граничних умов, відтворювався процес вдування струменя інертного газу, що моделюється.

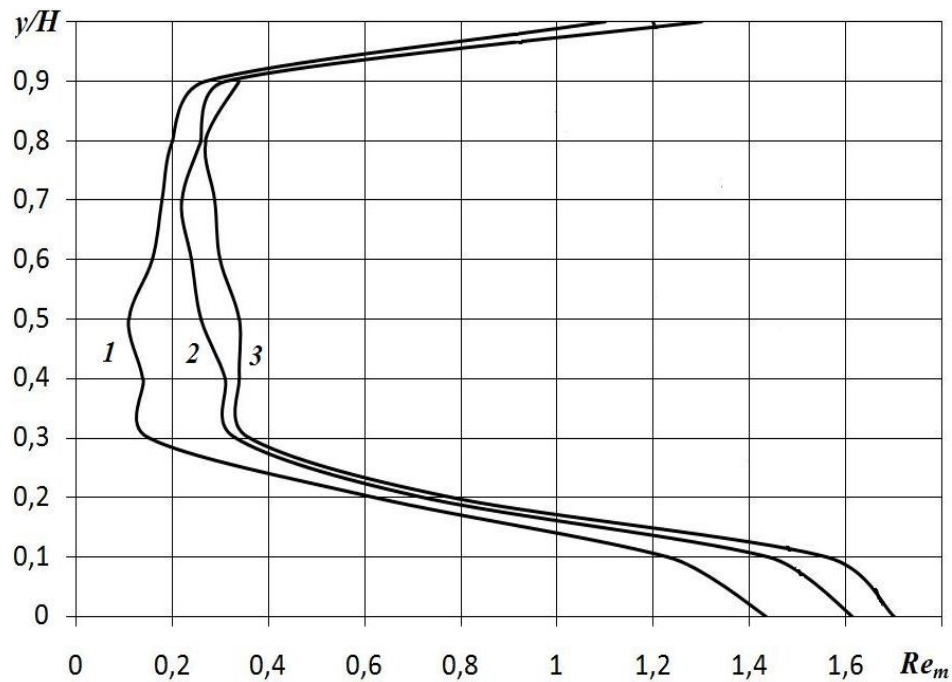


Рисунок 3.1 – Розподіл по висоті робочого об'єму параметра Re_m

1 - вертикальний перетин поблизу стінки вантажного танка, що відповідає замкненій області; 2 - вертикальний перетин в місці виходу повітря з вантажного танка; 3 - вертикальний перетин в місці подачі інертного газу.

В ході розрахунків було встановлено, що при використанні поліпшеної інертизації вантажних приміщень танкера за рахунок подачі струменів інертного газу можливо отримати сильну течію повітря вгору. Такий результат є автомоделним і при зміні об'ємної витрати інертного газу, що подається або розмірів суднового вантажного танка з урахуванням збереження його геометричної подоби залишатиметься завжди незмінним.

Конфігурації поля швидкості і тиску, що одержуються в цьому випадку, будуть також ідентичними. Цей результат можна побачити на рисунках 3.2 - 3.3. На графіках для двох значень числа Рейнольдсу рухомого багатофазного потоку показані зміна в часі величини сумарної завихореності Ω_Σ . Вона розраховувалася шляхом інтегрування результатів, отриманих за

стандартним виразом для визначення ротора швидкості потоку, що рухається [29, 66]

$$\text{rot } \bar{V} = \left[\frac{\partial v_z}{\partial y} - \frac{\partial v_y}{\partial z} \right] + \left[\frac{\partial v_x}{\partial z} - \frac{\partial v_z}{\partial x} \right] + \left[\frac{\partial v_y}{\partial x} - \frac{\partial v_x}{\partial y} \right]. \quad (3.2)$$

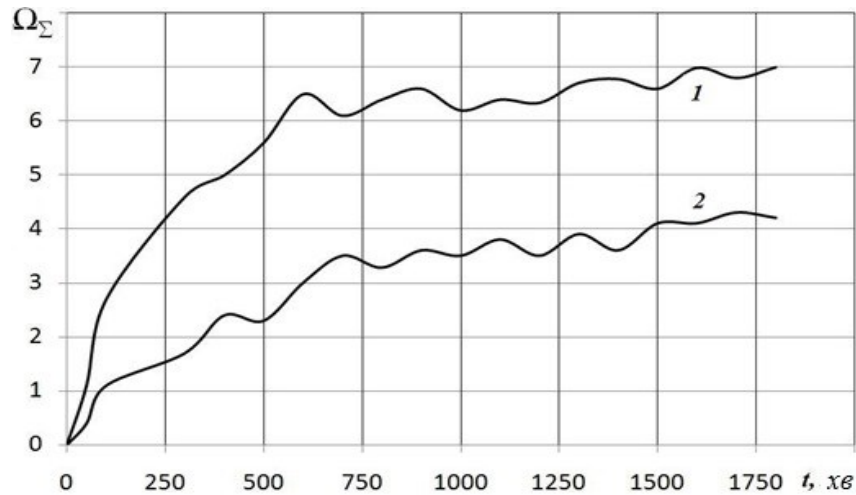


Рисунок 3.2 – Зміна величини сумарної завихореності Ω_Σ суміші повітря і інертного газу всередині вантажного танка при $Re = 5000$ (1 - вдосконалена подача інертного газу; 2 - стандартна подача інертного газу).

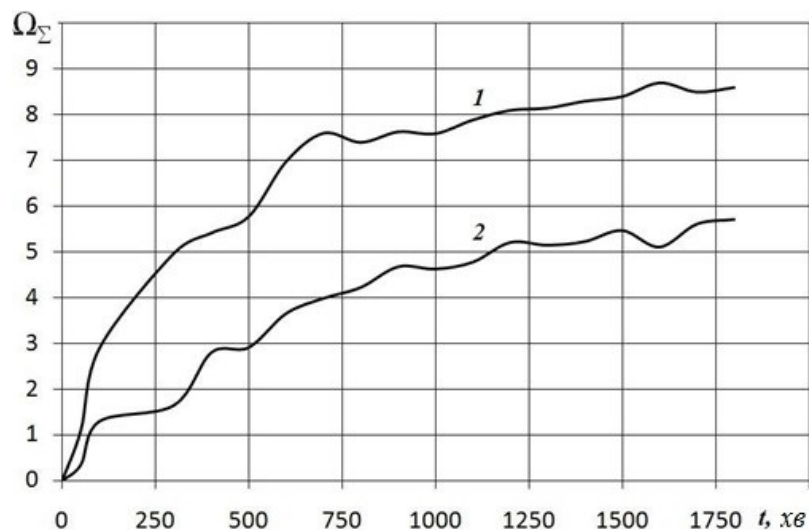


Рисунок 3.3 - Зміна величини сумарної завихореності Ω_Σ суміші повітря і інертного газу всередині вантажного танка при $Re = 8000$ (1 - вдосконалена подача інертного газу; 2 - стандартна подача інертного газу).

На наведених графіках обидві криві відповідають умовам витіснення повітря під час стандартної і вдосконаленої подачах інертного газу всередину вантажного танка нафтоналивного танкера.

На рух потоку інертного газу всередині вантажного танка крім витратних характеристик безпосередній вплив надає величина розподілу тиску. Крім статичного тиску рухомі струмені інертного газу мають також і динамічну складову. На швидкість процесу витискування повітря впливає саме динамічний напір. Найбільш характерні області впливу тиску на характер процесу інертизації знаходяться поблизу жорстких перегородок вантажного танка, загальна схема якого показана на схематичному рисунку 3.4. Оцінити ступінь такого впливу можна за характером розподілу коефіцієнта тиску на жорсткі перегородки вантажного танка.

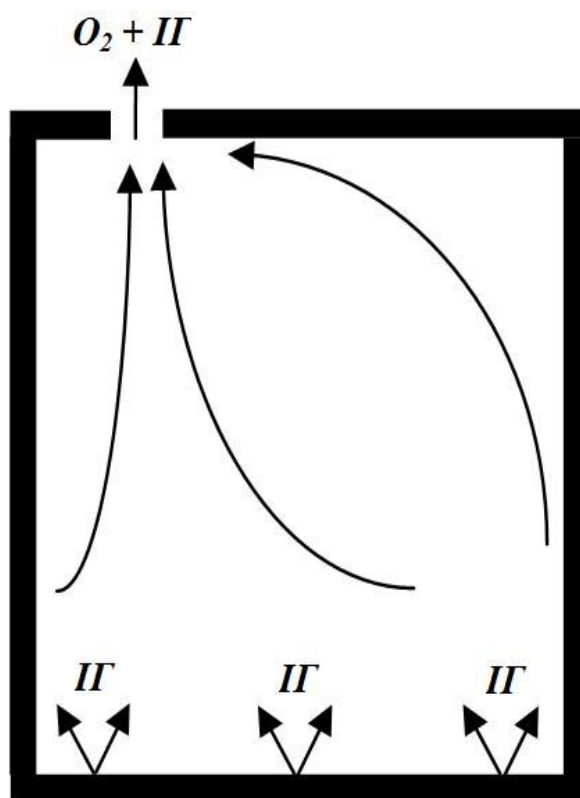


Рисунок 3.4 – Поперечний розріз вантажного танка
в області вихідного отвору

При проведенні розрахунків величина коефіцієнта тиску розраховувалася як

$$C_p = \frac{\Delta h \rho_c g}{\rho_\Gamma \frac{V_i^2}{2}}, \quad (3.3)$$

де Δh - величина тиску в поточному розрахунковому вузлі, м.вод.ст.; ρ_c - густина двофазного потоку інертного газу і повітря (визначається згідно з величиною концентрації повітря в розрахунковому вузлі), кг/м³; ρ_Γ - густина інертного газу, кг/м³; V_i - швидкість потоку в розрахунковому вузлі, м/с.

На рисунках 3.5-3.8 можна побачити, як змінювався коефіцієнт тиску при подачі інертного газу через центральну насадку з кутом конусу, що дорівнює 30 градусів. На всіх наведених графіках показані результати, які були отримані для трьох значень швидкості потоку інертного газу на вході в вантажний танк (1 - $V=2,341$ м/с; 2 - $V=4,325$ м/с; 3 - $V=8,635$ м/с) . Числа Рейнольдсу, розраховані з використанням висоти вантажного танка для цих швидкостей відповідно становили $Re_1=959426$, $Re_2=177251$, $Re_3=3538934$.

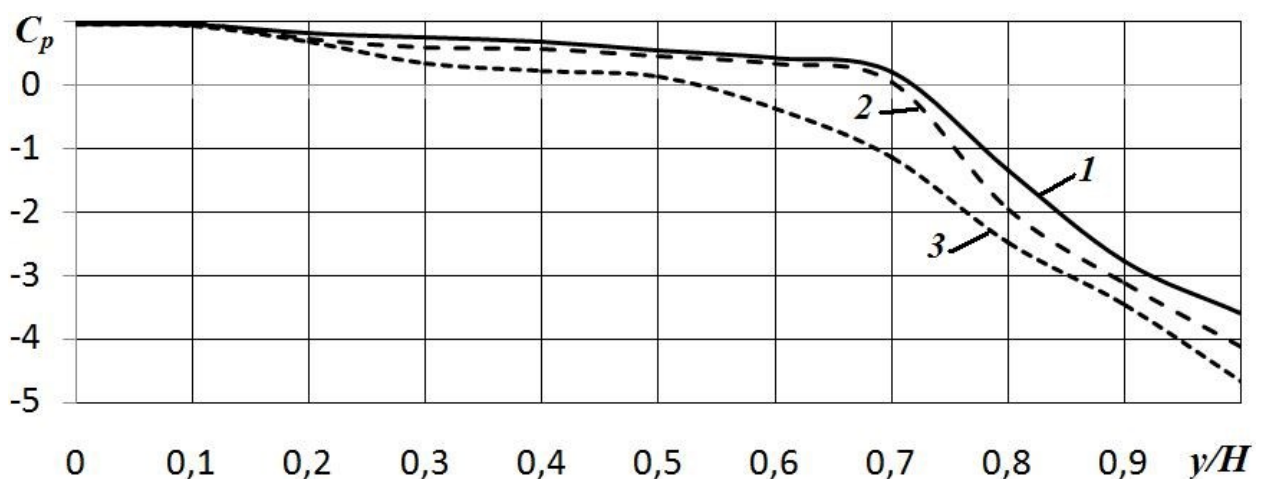


Рисунок 3.5 – Розподіл величини коефіцієнта тиску C_p на лівій

перегородці вантажного танка

1 - $Re = 959426$; 2 - $Re = 177251$; 3 - $Re = 3538934$

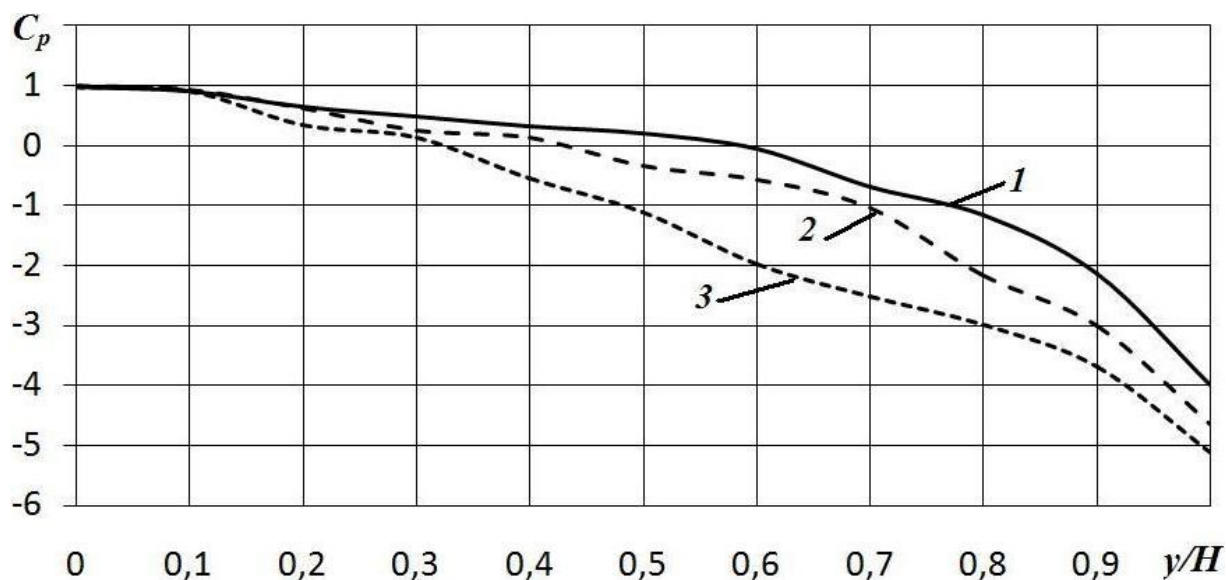


Рисунок 3.6 – Розподіл величини коефіцієнта тиску C_p на правій перегородці вантажного танка

1 - $Re = 959426$; 2 - $Re = 177251$; 3 - $Re = 3538934$

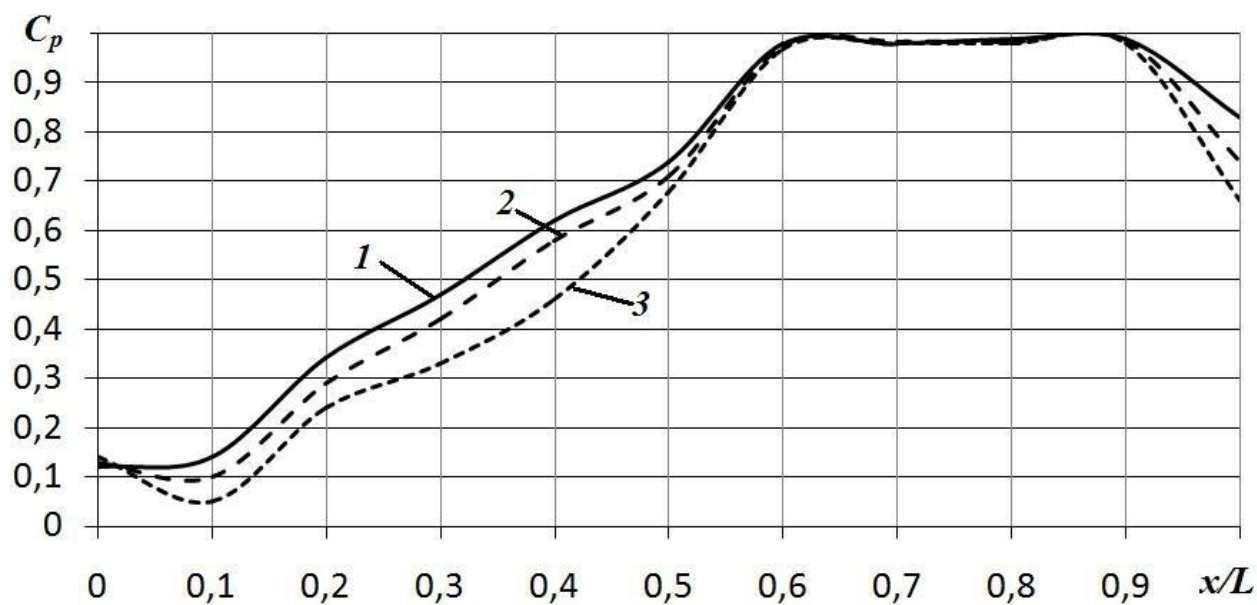


Рисунок 3.7 – Розподіл величини коефіцієнта тиску C_p на підволоку вантажного танка

1 - $Re = 959426$; 2 - $Re = 177251$; 3 - $Re = 3538934$

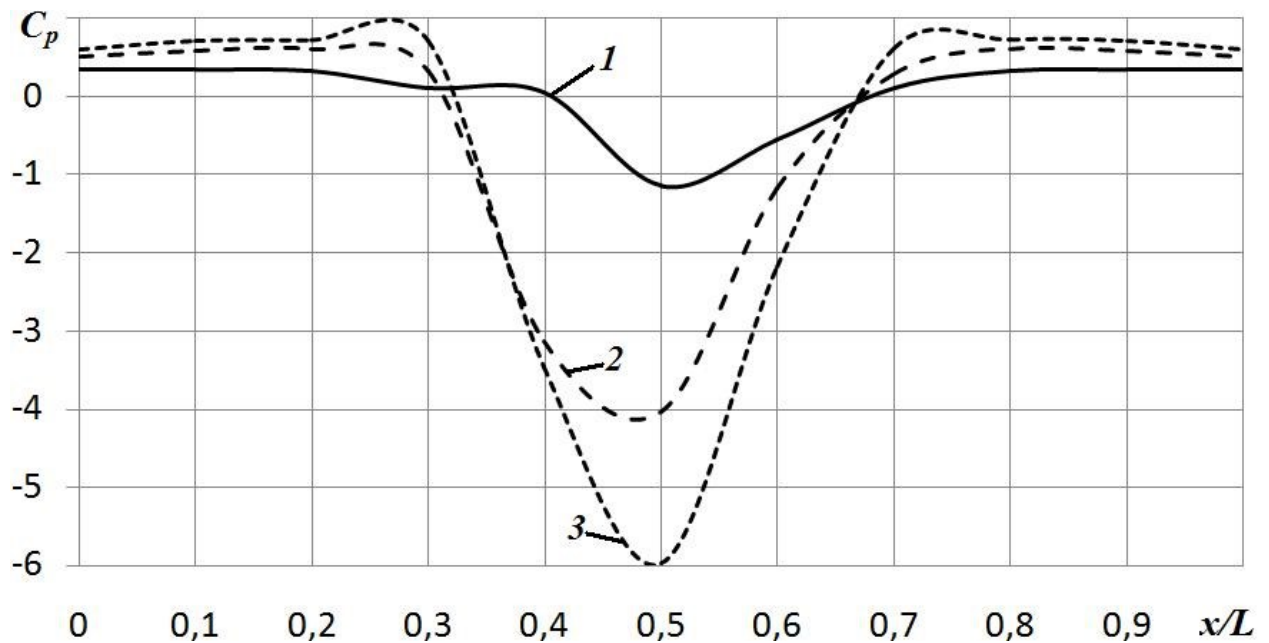


Рисунок 3.8 – Розподіл величини коефіцієнта тиску C_p на днищі вантажного танка

1 - $Re = 959426$; 2 - $Re = 177251$; 3 - $Re = 3538934$

Усередині замкненого простору танка на всіх наведених результатах розрахунків коефіцієнту тиску добре проглядаються характерні вихрові області. Вони сконцентровані поблизу кутових зон і характеризуються своєю симетричністю по відношенню до вертикальної віссі симетрії вантажного танка і стійкістю по відношенню до постійно зростаючого числа Рейнольдсу потоку, що моделюється. На підставі аналізу цих результатів можливо зробити висновок - подача струменів інертного газу для інертизації вантажного танка нафтоналивного танкера повинна проводитися в його центральній частині. В цьому випадку перемішування інертного газу з повітрям буде характеризуватися підвищеною турбулізацією і призводити до виникнення в областях кутових зон вантажного танка характерних зон перемішування. За рахунок присутності цих областей перемішування концентрація кисню буде зменшуватися до мінімального значення за більш короткі періоди часу в порівнянні з випадком стандартної подачі інертного газу зверху вантажного танка.

Досить інформативним індикатором якості проведення процесу інертизації є температура потоку на виході з вантажного танка. На рисунку 3.9 показано отриманий розрахунковим шляхом розподіл температури по висоті вантажного танка. Наведені дані отримані для моменту часу, який відповідає завершенню процесу інертизації. Дані графіка побудовані для вертикального перетину, що збігається з вихідним отвором для інертного газу. Як видно на побудованому графіку стабілізація температури до значення, що дорівнює 38°C настає всередині вантажного танка на висоті що становить 60 % від його повної висоти і надалі вже залишається незмінною.

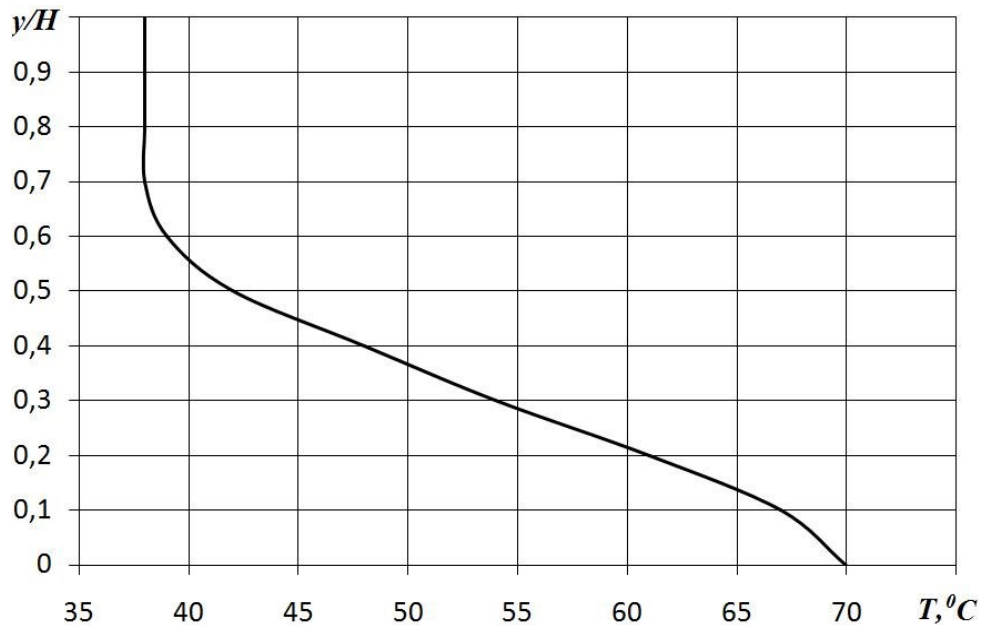


Рисунок 3.9 – Розподіл температури по висоті вантажного танка

Отриманий розподіл температури по висоті вантажного приміщення є універсальним. При проведенні розрахунків кінцеве значення висоти стабілізації температури для різної геометрії вантажного танка змінювалося в незначних межах. З урахуванням ідентичних значень відносної витрати інертного газу діапазон змін був обмежений величинами від 67 % (для малих вантажних танків, з висотою менше 4,5 м) до 58 % для (високих вантажних танків, з висотою понад 4,5 м).

3.2 Розрахунок процесу зміни концентрації кисню всередині вантажного танка нафтоналивного танкера

Найголовнішою характеристикою процесу інертизації вантажних танків нафтоналивного танкера є величина, що показує зниження концентрації кисню до нормативних значень. В ході розрахунків цей параметр визначався для різних швидкостей подачі інертного газу і основні результати показані на рисунках 3.10 - 3.14.

На графіку, який наведено на рисунку 3.10, показані порівняльні характеристики аналогічного процесу для двох випадків – стандартної і вдосконаленої подачах інертного газу. Кожна розрахункова точка на обох графіках є результатом осереднення поточних значень (в даний розрахунковий момент часу) концентрації кисню $O_2, \%$ в тих розрахункових вузлах, які відповідали місцю виходу потоку з вантажного танка судна, місце виходу потоку розташоване в одній з кутових зон подволоку вантажного танка.

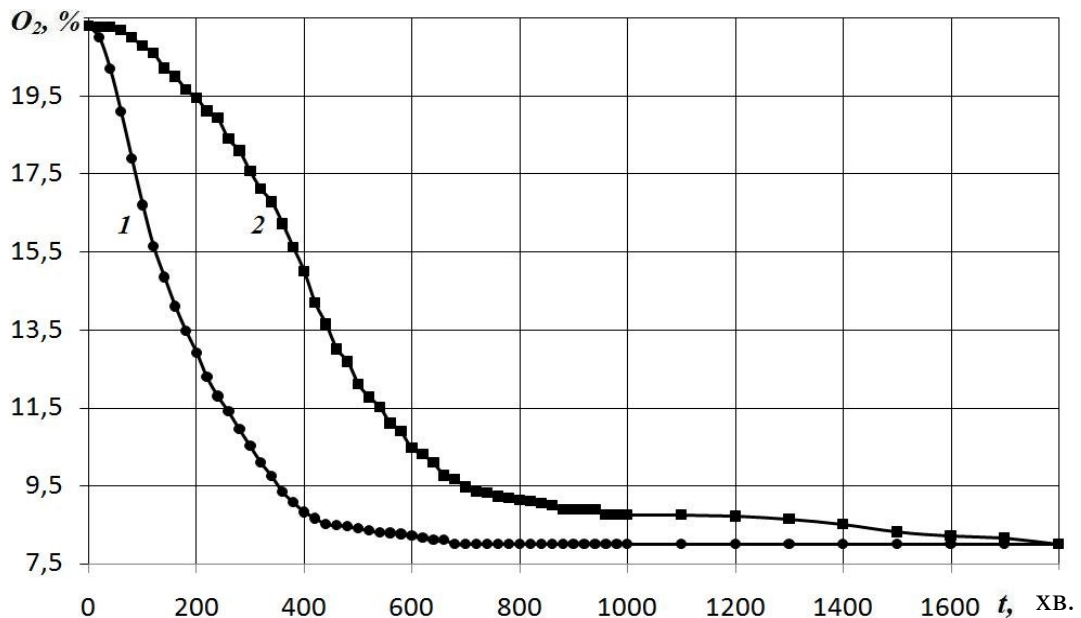


Рисунок 3.10 – Розрахунок процесу зниження концентрації кисню всередині вантажного танка при $Re = 8000$

1 - вдосконалена подача інертного газу; 2 - стандартна подача інертного газу.

Аналіз закономірності зміни концентрації кисню всередині вантажного танка у випадках стандартної і вдосконаленої подачах інертного газу показав, що вдосконалена подача інертного газу, істотно підвищує якісні показники процесу. Розрахункове зниження концентрації кисню від початкового значення 20,9 % в два рази при інших рівних умовах склало в разі стандартної подачі інертного газу 600 хвилин (концентрація кисню знизилася до 10,47 %). Під час вдосконаленої подачі інертного газу аналогічний час склав всього 300 хвилин (концентрація кисню знизилася до 10,52 %). Нормативно допустиме розрахункове значення концентрації кисню у 8 % в разі стандартної подачі інертного газу було досягнуто за 1800 хвилин, а для вдосконаленої подачі інертного газу за 680 хвилин.

На підставі отриманих розрахункових даних можливо зробити висновок, що незалежно від розміру вантажного танка при інших рівних умовах, можливо скоротити час процесу інертизації танкера на 62 %. При проведенні розрахунків для одних і тих ж самих вантажних приміщень прогнозоване скорочення часу інертизації склало 18 годин 40 хвилин.

На підставі розробленої математичної моделі руху інертного газу всередині повітря в замкненому просторі вантажного танка були отримані результати, що описують структуру потоку, що рухається. Розрахунок поля температури, поля швидкості, поля концентрації кисню і поля тиску під час процесу інертизації проводився для трьох технологічних схем подачі інертного газу.

Перша схема подачі відповідає стандартній подачі інертного газу з трубопроводу.

Друга схема передбачає використання для подачі інертного газу однієї насадки з кутом конусності 30 градусів.

Третя схема відповідає випадку подачі інертного газу з п'яти насадок з кутом конусності, що дорівнює 30 градусів.

Концентрація кисню всередині вантажного танка при проведенні теоретичних досліджень також визначалася для трьох випадків подачі

інертного газу: стандартна подача інертного газу через трубопровід; подача інертного газу з однієї насадки з кутом конусності 30 градусів і подача інертного газу з п'яти насадок з кутом конусності 30 градусів.

Під час розрахунків була розрахована зміна концентрації кисню по висоті вантажного танка. На рисунку 3.11 показаний розподіл по висоті концентрації кисню під час процесу інертизації. Час процесу заповнення інертним газом вантажного танка відповідає 400 хвилинам. Всі розрахункові значення на графіку відповідають поперечному перерізу вантажного танка судна на рівні вихідного отвору для повітря. Самі верхні точки відповідають значенню відносної висоти вантажного танка, що дорівнює 0.95.

Аналіз всіх трьох кривих дозволяє зробити висновок, що розподіл кисню по висоті вантажного приміщення не є однорідним. У кожному разі він залежав від висоти заповнення інертним газом простору вантажного танка.

В якості прикладу, що показує неоднорідність розподілу концентрації кисню по ширині танка, можна навести дані рисунків 3.12 - 3.14. На графіках для трьох різних способів подачі інертного газу показано розподіл концентрації кисню в поперечній площині вантажного танка на висоті, що дорівнює 70% ($0,7Y/H$).

З трьох наведених графіків видно, що в силу процесів перенесення теплоти і маси, вторинні течії, що виникають, призводили до нерівномірного розподілу величини концентрації кисню всередині вантажного танка. Під час проведення розрахунків діапазон змін величини концентрації кисню в довільно взятому поперечному перерізі вантажного танка знаходився в межах від 0.43 до 1,14 %. Менші значення цього діапазону завжди відповідали нижній і середній частині вантажного танка, а максимальні відхилення (що перевищують величину 1 %) мали місце лише в його верхній частині.

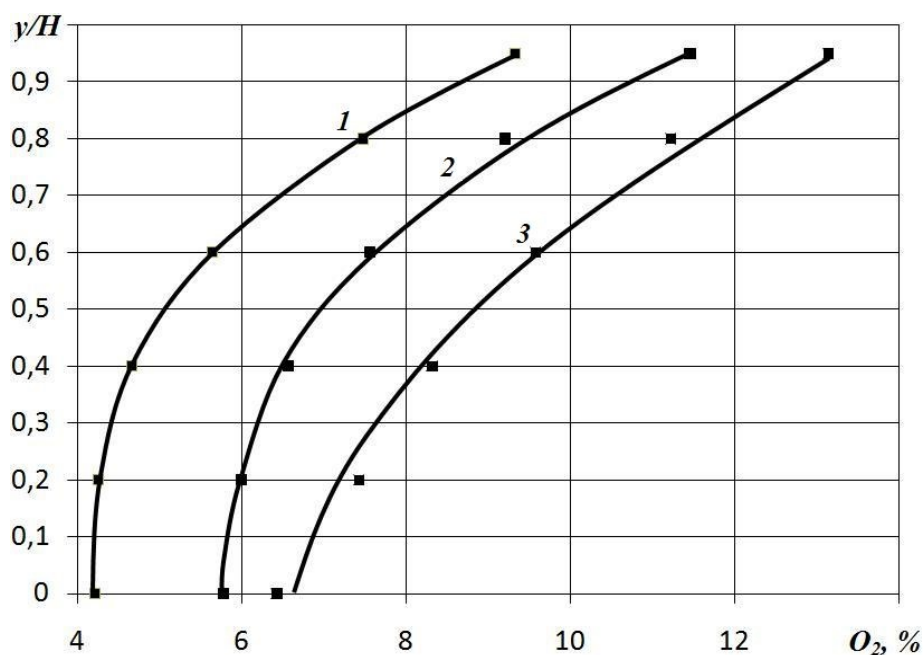


Рисунок 3.11 – Розподіл концентрації кисню по висоті танка

- 1 - подача інертного газу з п'яти насадок з кутом конусності 30 градусів;
 2 - подача інертного газу з однієї насадки з кутом конусності 30 градусів;
 3 - стандартна подача інертного газу.

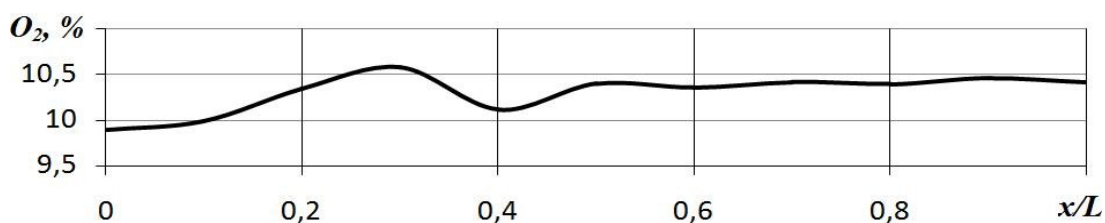


Рисунок 3.12 – Розподіл концентрації кисню по ширині вантажного танка при стандартній подачі інертного газу

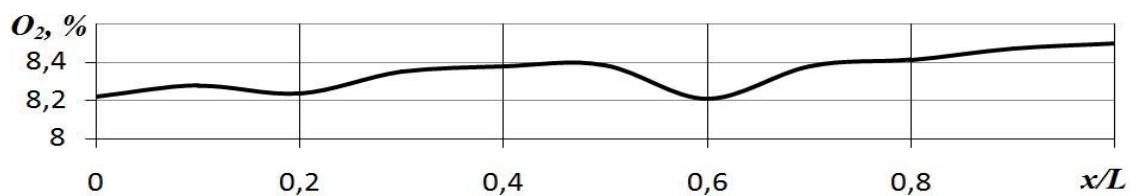


Рисунок 3.13 – Розподіл концентрації кисню по ширині вантажного танка при подачі інертного газу з однієї насадки з кутом конусності 30 градусів

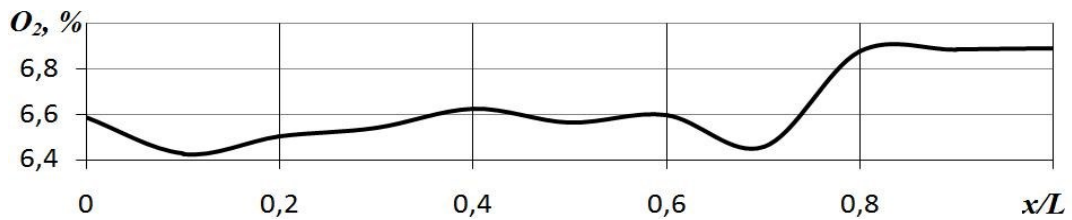


Рисунок 3.14 – Розподіл концентрації кисню по ширині вантажного танка при подачі інертного газу з п'яти насадок з кутом конусності 30 градусів

3.3 Висновки по розділу 3

1. Характер розподілу сіткового числа Рейнольдсу Re_m у всій розрахунковій області показав високу якість проведених розрахунків з моделювання процесу інертизації вантажного приміщення танкера. Чисельне значення величини Re_m завжди було менше двох і змінювалося в діапазоні від 0,001 до 1,7.

2. В ході розрахунків було встановлено, що при використанні вдосконаленої подачі інертного газу всередину вантажних танків танкера за рахунок подачі струменів інертного газу можливо отримати сильну течію повітря вгору. Подача інертного газу повинна проводитися в центральній частині вантажного танка. В цьому випадку перемішування інертного газу з повітрям характеризується підвищеною турбулізацією і призводить до виникнення в областях кутових зон вантажного танка характерних зон перемішування.

3. При проведенні розрахунків кінцеве значення висоти стабілізації температури для різної геометрії вантажного танка змінювалося в незначних межах. З урахуванням ідентичних значень відносної витрати інертного газу діапазон змін був обмежений величинами від 67 % (для вантажного танка

малої висоти, тобто менше 4,5 м) до 58 % для (високих вантажних танків, понад 4,5 м).

4. Аналіз закономірності зміни концентрації кисню всередині вантажного танка у випадках стандартної і вдосконаленої подачах димового газу показав, що вдосконалена подача інертного (димового) газу, істотно підвищує якісні показники процесу. Розрахункове падіння концентрації кисню від початкового значення 20,9% в два рази при інших рівних умовах склало в разі стандартної подачі інертного газу 600 хвилин (концентрація кисню знизилася до 10,47 %). При вдосконаленій подачі інертного газу аналогічний час склав 300 хвилин (концентрація кисню знизилася до 10,52 %). Нормативно допустиме розрахункове значення концентрації кисню у 8,0 % в разі стандартної інертизації було досягнуто за 1800 хвилин, а під час поліпшеної інертизації за 680 хвилин.

6. Незалежно від розміру вантажного приміщення танкера при інших ідентичних умовах розрахунковий час процесу інертизації танкера скорочується на 62 %. При проведенні розрахунків для одних і тих ж самих вантажних приміщень прогнозоване скорочення часу інертизації склало 18 годин 40 хвилин.

7. Розподіл кисню по висоті вантажного приміщення не є однорідним. Він залежить від висоти заповнення інертним газом простору вантажного приміщення танкера.

Під час проведення розрахунків діапазон змін величини концентрації кисню в довільно взятому поперечному перетині вантажного приміщення знаходився в межах від 0,43 до 1,14%. Менші значення цього діапазону завжди відповідали нижній та середній частини вантажного приміщення, а максимальні відхилення (що перевищують величину 1%) мали місце лише в його верхній частині.

РОЗДІЛ 4.

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ ІНЕРТИЗАЦІЇ ВАНТАЖНИХ ТАНКІВ НАФТОНАЛИВНОГО ТАНКЕРА

4.1 Основні положення методики проведення експериментальних досліджень

Поліпшення процесу інертизації вантажних танків нафтоналивних танкерів передбачає проведення дослідницьких робіт в застосуванні технології вдосконаленої примусової подачі інертного газу всередину вантажного танка. З цієї причини для її реалізації була розроблена методика проведення експериментальних досліджень. Головна мета цієї методики полягає в формулюванні основних положень, при реалізації яких, нові результати досліджень, що отримуються будуть характеризуватися найменшою похибкою і володіти найбільшою інформативністю.

При проведенні експериментів швидкості досліджуваних потоків інертного газу характеризуються значеннями швидкості менше 30 м/с. На підставі цього факту, відповідно до даних робіт [3, 11, 17, 19, 29, 40], ефекти стисливості і зміну густини потоків під час їх руху можливо не враховувати.

Головним об'єктом досліджень є система інертного газу танкера, яка включає до себе лінії і пристрої подачі інертного газу всередину суднових вантажних танків. Основними параметрами, що вимірюються є: час процесу інертизації, концентрація кисню в повітряній атмосфері вантажного танка, густина і склад продуктів згоряння палива в системі інертного газу.

До основних положень методики проведення досліджень належать наступні:

1. Всі експерименти необхідно проводити безпосередньо в умовах експлуатації танкера з урахуванням специфіки нагнітального обладнання, що

використовується, системи автоматичного управління, а також роботи запірної і регулювальної арматури і геометричних особливостей конфігурації підвідних каналів.

Досліджувана система розподільчої подачі інертного газу до вантажного танка судна повинні розглядатися, як експериментальний промисловий зразок для подальшого впровадження на однотипних танкерах.

2. Всі лінії подачі і відведення повинні бути герметичними. Для відсутності впливу статичних навантажень при проведенні експериментів не можна допускати зміни величини статичного тиску в системі.

3. З метою виходу на стаціонарні значення основних показників досліджуваного процесу і рівномірного розподілу інертного газу в просторі вантажних танків регулювання їх подачі необхідно проводити плавно зі змінами в діапазоні від п'яти до десяти відсотків від поточного значення величини витрати інертного газу. В цьому випадку вимірювання концентрації кисню в судовому вантажному танку повинні проводитися через п'ять хвилин після зміни витрати інертного газу.

4. Всі вимірювання концентрації кисню в повітрі усередині танка повинні проводитися безперервно в ході всього процесу інертизації. Початком процесу повинно вважатися відкриття нагнітальної арматури в лінії подачі інертного газу. Для можливості зіставлення результатів, що одержуються при стандартній і вдосконаленій подачах інертного газу, необхідно вимірювання проводити з однаковим кроком по часу, що дорівнює десять хвилин.

З урахуванням правил теорії статистики і теорії проведення інженерного експерименту [13, 22, 28, 38, 42, 49] при статистичній обробці результатів експериментів для кожного моменту часу генеральна вибірка величини концентрації кисню в повітрі повинна складатися з десяти і більше результатів ідентичних вимірів.

5. З метою контролю величини кінематичної в'язкості суміші повітря з інертним газом при проведенні експериментів необхідно постійно вимірювати температуру всередині судового вантажного танка. Осереднення

температури повинно здійснюватися за результатами одночасних замірів в чотирьох створах. Ці створи по висоті танка повинні розподілятися на однакових відстанях один від одного.

6. Закінченням експериментів при отриманні дослідних даних щодо інертизації вантажного танка повинен вважатися момент часу, після якого: концентрація кисню всередині танка залишається постійною на рівні менше 8 %; температура всередині танка знаходиться на рівні менше 40 °С.

4.2 Технологія процесу інертизації вантажного танка нафтоналивного танкера з використанням вдосконаленої подачі інертного газу

Поліпшення процесу інертизації за допомогою вдосконаленої подачі інертного газу в вантажний танк нафтоналивного танкера для його інертизації повинно ґрунтуватися на структурі потоку повітря, що рухається з невисокими швидкостями всередині жорстких стінок вантажного танка, що обмежують його. Як показано в попередніх розділах основна зміна в епіюрах швидкості, завихореності і температури спостерігається тільки в кутових зонах вантажного танка. З цієї причини дуже важливим є подача струменів інертного газу саме в ядро повітряного потоку, що рухається вгору. У цьому випадку, як показано нижче турбулізація сталого потоку в середній частині вантажного танка буде приводити тільки до скорочення часу процесу його інертизації.

Дуже важливим питанням з точки зору виготовлення та монтажу системи вдосконаленої подачі інертного газу є кількість джерел струменів інертного газу на днищі вантажного танка і кут розкриття α їх факелу. Менші кути розкриття будуть призводити до подовження струменя інертного газу, а значить збільшувати зону турбулізації ядра потоку повітря по висоті танка. Великі кути будуть впливати на інтенсифікацію процесу тепло і масопереносу в кутових зонах нижньої частини вантажного танка. З цієї причини на стадії

експериментального вивчення поліпшення процесу інертизації вантажного танка були використані три технологічні схеми. Вони показані на рисунку 4.1.

Перша схема (див. рис. 4.1-а) системи інертизації містила тільки одну точку подачі струменя інертного газу. Вона була розташовуна в центральній точці вантажного танка. В ході експериментів використовувалося три насадки з кутами α розкриття конусу факелу струменя, що витікає, відповідно такими, що дорівнюють 160° , 90° і 30° .

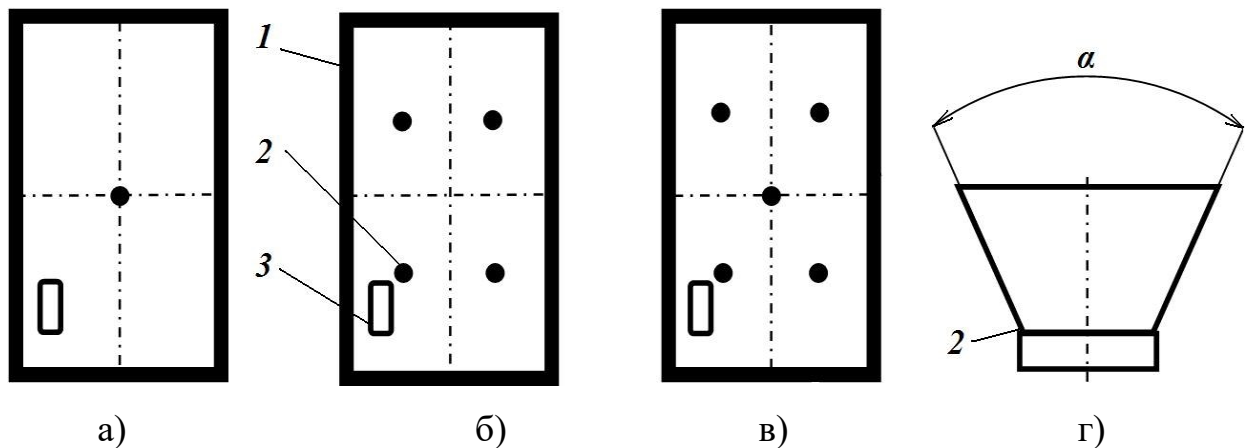


Рисунок 4.1 - Схеми подачі струменів інертного газу у вантажний танк
а - перша схема; б - друга схема; в - третя схема; г – насадка для подачі газу
1 - вантажний танк; 2 – насадка для подачі інертного газу; 3 - вихідний отвір

Друга схема (див. рис. 4.1-б) системи інертизації містила чотири точки подачі струменів інертного газу, які на днищі вантажного танка розташовувалися хрестоподібно.

Насадки встановлювалися по діагоналі в центрах чотирьох однакових прямокутних зон підлоги вантажного танка. У другій схемі були використані насадки, що створюють кут розкриття конусу факелу струменя в 30° . Цей кут використовувався для виключення взаємного впливу струменів інертного газу при їх витіканні в повітряний простір.

Третя схема (див. рис. 4.1-в) системи інертизації була комбінована і показала найкращі результати. Кількість точок подачі струменів інертного газу дорівнювала п'яти.

Основні рекомендації проведення монтажних операцій по установці всередині вантажного танка насадок для подачі струменів інертного газу описані нижче в розділі 5.3.

4.3 Основні результати експериментальних досліджень процесу інертизації вантажного танка нафтоналивного танкера

Відповідно до описаних в попередньому розділі трьох схем подачі інертного газу у вантажний танк нафтоналивного танкера були виміряні значення зміни величини концентрації кисню при інертизації вантажного танка. Виміри проводилися на різних висотах вантажного танка (методика розташування вимірювальних створів викладена нижче в розділі 5.2). На рисунках 4.2-4.4 показані зведені результати проведених натурних досліджень.

Оскільки при проведенні експериментів головним питанням був вибір найбільш результативної схеми подачі інертного газу то тривалість роботи газоаналізатора була обмежена періодом в 5 годин. Наведена на графіках величина концентрації кисню визначалася, як середня величина для всіх чотирьох вимірювальних створів (центрального, на виході і двох проміжних).

Як видно на рисунку 4.2 найкращий кут розпилу інертного газу відповідає величині розкриття сопла, щодорівнює 30° . Отримані в цьому випадку значення концентрації кисню всередині вантажного танка були найменшими. Це пояснюється більшою дальністю дії струменя інертного газу і відповідно збільшенням зони конвективної взаємодії інертного газу з повітрям. Як видно на всіх графіках характер зміни в часі концентрації кисню всередині вантажного танка в усіх чотирьох випадках залишався практично ідентичним. Цей результат дозволяє зробити висновок, що вплив кутів розкриття струменів інертного газу на характер витискування повітря з танка

не є основним, а сам процес залежить в основному від ступеня стратифікації, що пов'язаний з густиною інертного газу всередині вантажного танка.

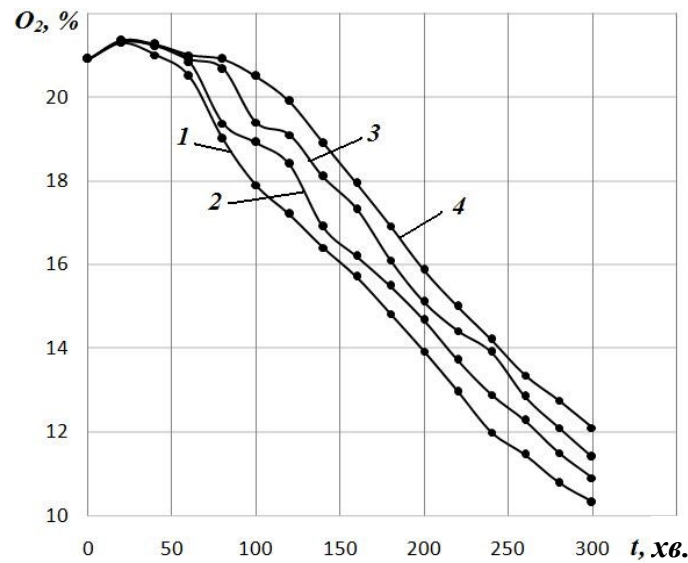


Рисунок 4.2 – Швидкість зміни концентрації кисню в вантажному танку при використанні першої схеми подачі інертного газу

1 - кут розкриття струменя 30°; 2 - кут розкриття струменя 90°;

3 - кут розкриття струменя 160°; 4 - стандартна подача інертного газу

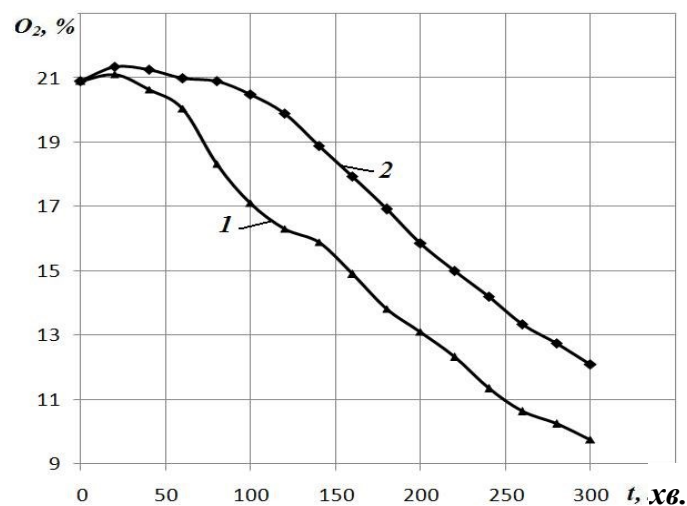


Рисунок 4.3 – Швидкість зміни концентрації кисню в вантажному танку при використанні другої схеми подачі інертного газу

1 - кут розкриття струменя 30°; 2 - стандартна подача інертного газу

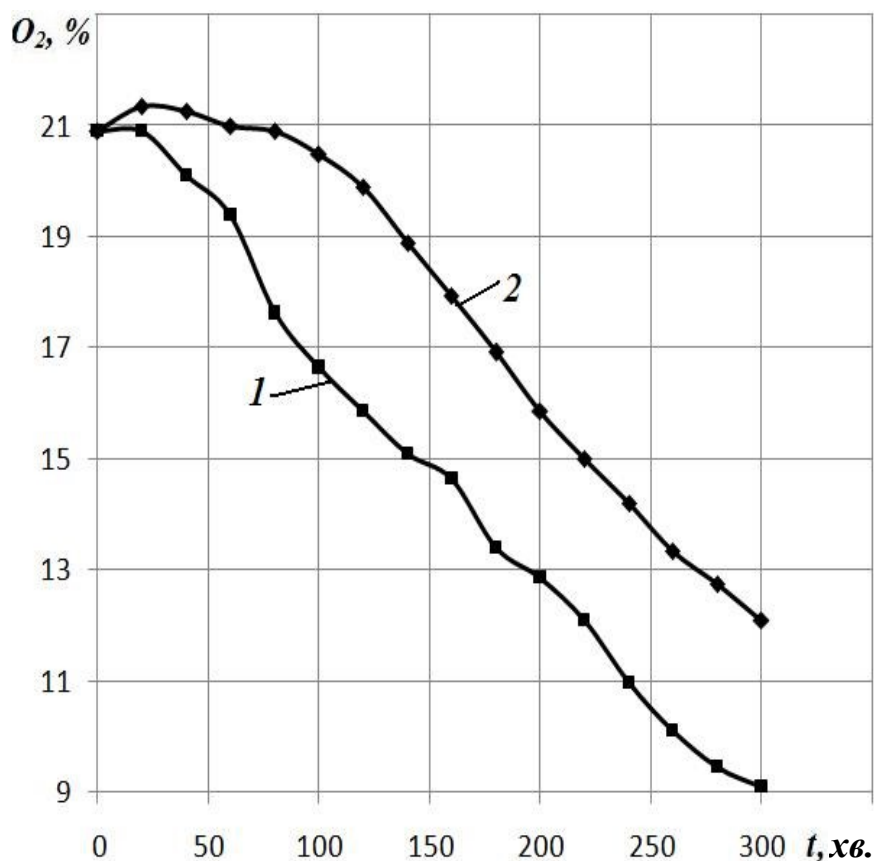


Рисунок 4.4 – Швидкість зміни концентрації кисню в вантажному танку при використанні третьої схеми подачі інертного газу

1 - кут розкриття струменя 30° ; 2 - стандартна подача інертного газу

Якість роботи другої схеми подачі інертного газу в порівнянні з першою схемою краще, але як видно на рисунку 4.5 найкращий результат в скороченні часу інертизації вантажного танка був досягнутий з використанням третьої схеми. У порівнянні з використанням стандартної подачі інертного газу зміни в кращу сторону при інших рівних умовах призвели до додаткового зменшення концентрації кисню за той же самий період інертизації вантажного танка.

При проведенні експериментальних досліджень були виконані вимірювання, що описують процес зміни концентрації кисню в вантажному танку нафтоналивного танкера в ході його інертизації шляхом примусової подачі інертного газу.

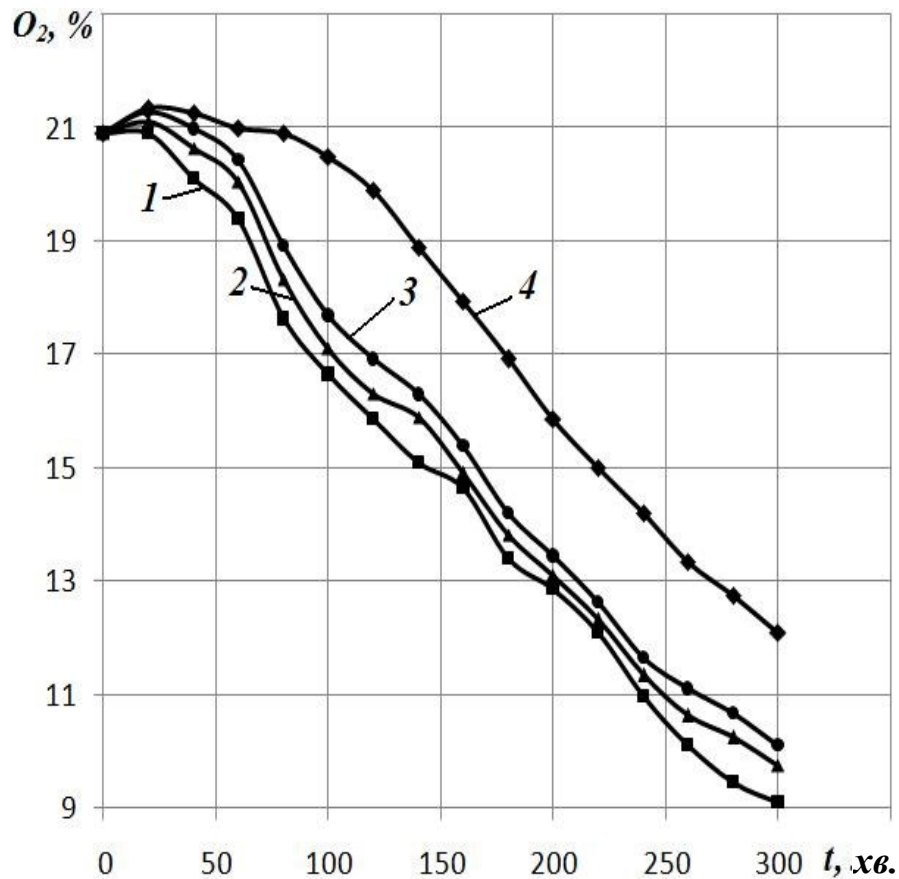


Рисунок 4.5 – Швидкість зміни концентрації кисню в танкі при використанні трьох схем подачі інертного газу

1 – третя схема подачі; 2 - друга схема подачі;

3 - перша схема подачі; 4 - стандартна подача інертного газу

Ці дані були зіставлені з результатами вимірювання аналогічного параметру при стандартній подачі інертного газу в вантажний танк судна і з результатами теоретичних досліджень на основі розробленої математичної моделі. Всі результати показані на зведеному рисунку 4.6.

Наведені на графіку значення концентрації кисню відповідають точці виходу повітря з вантажного танка в атмосферу. Експериментальні дані, показані на цьому графіку, були отримані для одного й того ж вантажного танка нафтоналивного танкера, яке одного разу заповнювалося інертним газом за стандартною схемою подачі, а другий раз і з використанням розробленої комбінованої схеми (див. підрозділ 4.2).

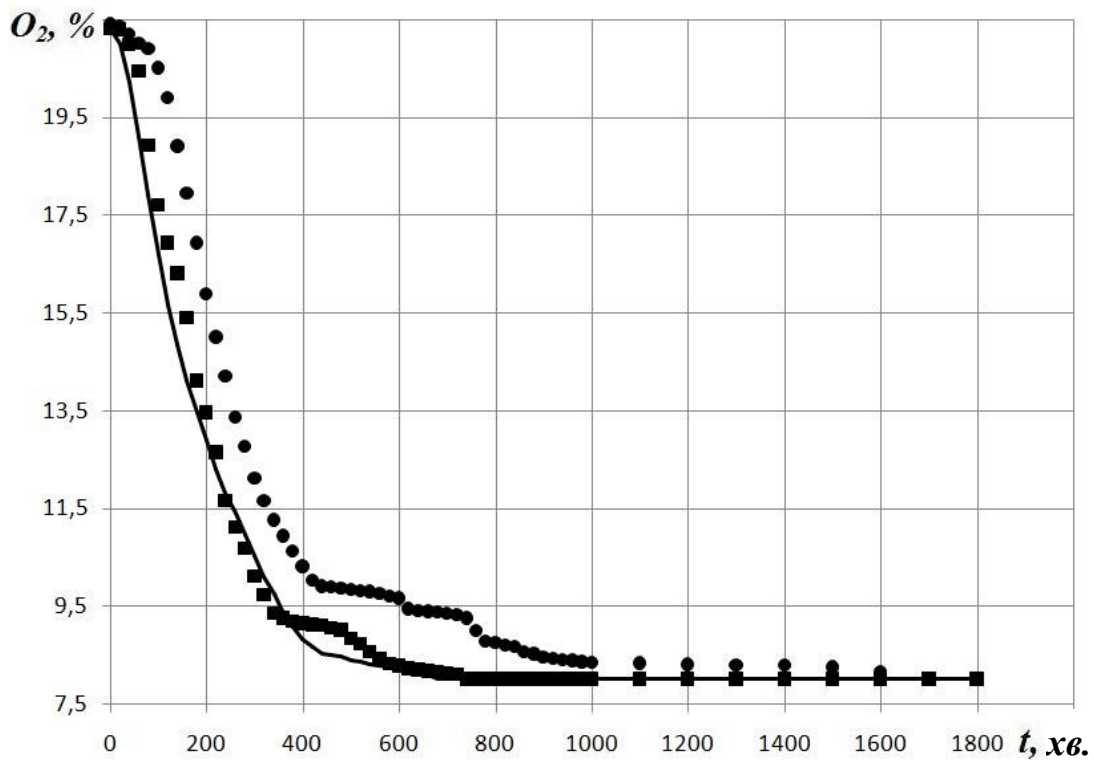


Рисунок 4.6 – Зміна концентрації кисню при інертизації вантажного танка нафтоналивного танкера

- – стандартна подача інертного газу;
- – вдосконалена подача інертного газу;
- суцільна лінія – розрахунок.

Як видно з графіків використання вдосконаленої подачі призводило до кількісної розбіжності в зміні в часі концентрації кисню всередині вантажного танка. Отримана розбіжність між двома експериментальними кривими показує, що використання вдосконаленої подачі інертного газу всередину вантажного танка призводить до отримання найголовнішого результату - скорочення часу, що витрачається на інертизацію вантажних танків нафтоналивного танкера перед отриманням нового вантажу. На графіку видно, що на початку процесу інертизації зміна концентрації кисню відбувається однаково незалежно від способу подачі інертного газу. Істотне розходження між кривими починається через 80 хвилин після початку процесу інертизації вантажного танка. В залежності від способу інертизації вантажного танка

кінцева концентрація кисню, що отримується всередині його простору, відрізняється і її значення в разі поліпшеної інертизації стає менше, ніж при стандартній. На рисунку 4.6 видно, що вихід на значення концентрації кисню, що дорівнює 8 % при вдосконаленій подачі інертного газу спостерігається приблизно через 740 хвилин після початку процесу інертизації танка. В ході стандартної інертизації танка вихід концентрації кисню на значення 8 % спостерігався приблизно через 1700 хвилин після початку процесу інертизації вантажного танка.

У процентному співвідношенні скорочення витраченого часу для інертизації вантажного танка при переході від стандартної до поліпшеної схеми інертизації танка склало 56,47 %.

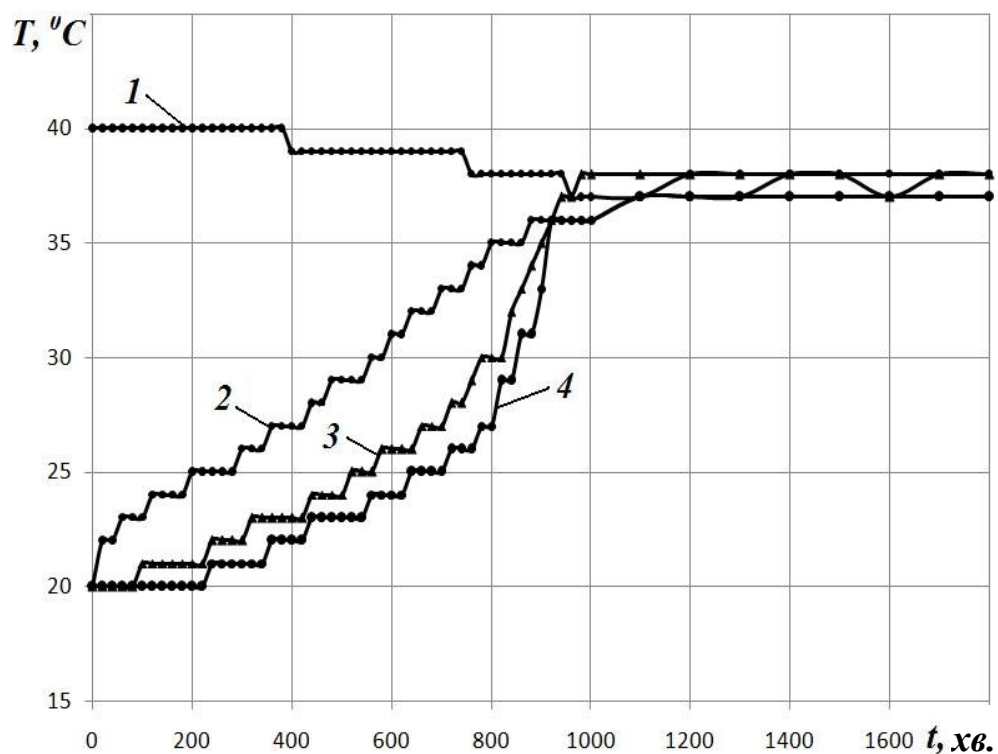


Рисунок 4.13 – Характер зміни температури по висоті H вантажного танка при його інертизації

1 - вимірювальний створ на дні танка; 2 - вимірювальний створ на висоті танка $0,25H$; 3 - вимірювальний створ на висоті танка $0,5H$; 4 - вимірювальний створ на висоті танка $0,75H$.

В ході витискування повітря інертним газом температура всередині вантажного танка постійно зростала. Процес її зміни по висоті вантажного танка в часі був вивчений і отримані результати показані на рисунку 4.7. Наведені чотири криві відповідають чотирьом вимірювальним створам, які розташовувалися на відповідних висотах: 0, 0,25Н, 0,5Н, 0,75Н. Відповідно до розробленої методики вимірювань по висоті вантажного танка вимірювальні створи були розташовані на однаковій відстані один від одного.

За аналогією з процесом зміни концентрації кисню всередині простору вантажного танка також спостерігалась стабілізація температури повітря і інертного газу. Як видно на чотирьох графіках рис. 4.7, починаючи з моменту часу, щодорівнює 960 хвилин температура на всіх вимірювальних рівнях перестає змінюватися і приймає своє стаціонарне значення.

При порівнянні результатів вимірювань температури на виході з танка при стандартній і поліпшеній інертизаціях було встановлено, що стабілізація в останньому випадку також настає раніше. Температурний градієнт, що становив -17°C досягався за час менший на 38,18% в порівнянні зі стандартною операцією інертизації вантажного танка нафтоналивного танкера.

4.4 Оцінка похибки експериментальних досліджень

Проведення експериментальних досліджень повинно завжди містити крім набору отриманих результатів вимірювань оцінку їх похибки [22]. В теорії інженерного експерименту [28, 49], що заснована на теорії статистики [13] прийнято використання довірчих інтервалів. У цих інтервалах важливе значення має середньоквадратична похибка отриманих результатів. Її розрахунок повинен проводитися з урахуванням похибок всіх приладів і засобів вимірювання, що беруть участь в експерименті [49, 69]. Сукупність

приватних похибок всіх цих приладів визначає в кінцевому підсумку комплексну похибку отриманих експериментальним шляхом результатів.

Незалежно від того, яка величина вимірюється, числова база отриманих результатів завжди характеризується максимальним і мінімальним значенням. Відповідно до правил статистики чисельне значення відносної похибки A з рівнем довіри, що становить 95% повинно розраховуватися за виразом [13, 22, 38, 42]

$$\delta_A = \frac{A_{max} - A_{min}}{\sqrt{3} \frac{[A_{max} + A_{min}]}{2}} 100. \quad (4.1)$$

В ході експериментів відповідно до правил вимірювань [48] відносна похибка отриманих результатів завжди розраховувалася з цього виразу і була представлена не більше ніж двома знаковими цифрами.

На початковій стадії досліджень на судні відбувався вимір наступних розмірів: габаритів вантажного приміщення; геометричних характеристик каналів для підведення інертного газу; габаритів і відносного положення вихідного отвору на подволоку для витискування повітря в навколишнє середовище; діаметрів трубопроводів, відстаней між місцями встановлення датчиків вимірювання температури і тиску; кутів нахилу напрямкових каналів.

Всі перераховані геометричні розміри були виміряні з використанням лазерного вимірювача відстаней марки optoNCDT ILR 1031-50/LC1, виробник Micro-Epsilon Messtechnik, Німеччина.

У відповідності з паспортними характеристиками фірми виробника цей прилад в межах робочих температур навколишнього середовища від -30°C до $+50^{\circ}\text{C}$ має абсолютну похибку вимірювань лінійних розмірів, щодорівнює $0,002\%$ (± 1 мм при вимірюванні відстані до 50 метрів) [76].

Діаметри насадок для створення струменів Π вимірювалися з використанням мікрометра з ціною вимірювання $0,001$ мм. Його маркування - QuantuMike SERIES 293-IP65 Micrometer, виробник Mitutoyo, Японія.

У відповідності з характеристиками фірми виробника абсолютна похибка вимірювання лінійних розмірів мікрометра складає $2\mu\text{m}$ [79].

Вимірювання концентрації основних компонент багатофазного газового потоку на виході з вантажного танка при роботі системи інертних газів вироблялося з використанням портативного електрохімічного аналізатора газів. Його маркування - Nova 5300 Series Portable Flue Gas Analyzer, виробник Nova Analytical Systems, Nova Goodfellow Inc., Канада.

У відповідності з паспортними характеристиками фірми виробника цей електрохімічний газовий аналізатор в межах робочих температур навколишнього середовища від $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+50\text{ }^{\circ}\text{C}$ може вимірювати концентрації основних газових компонент, які входять до складу повітря і інертного газу. Діапазони їх вимірювань, такі:

- діоксид вуглецю CO_2 від 0 до 20.0%;
- кисень O_2 від 0 до 25%;
- діоксид сірки SO_2 від 0-200 до 0-2000 ppm;
- оксид азоту NO від 0-200 до 0-5000 ppm;
- діоксид азоту NO_2 від 0-200 до 0-800 ppm;
- оксид вуглецю CO від 0-200 до 0-9999 ppm.

Час вимірювання концентрації окремо взятої компоненти становить:

- до 30 секунд для: кисню O_2 , оксиду вуглецю CO і діоксиду сірки SO_2 ;
- до 60 секунд для: оксиду азоту NO ; діоксиду азоту NO_2 .

У відповідності з паспортними характеристиками фірми виробника всім наведеним діапазонам вимірювань концентрацій основних компонент газового потоку на виході з вантажного приміщення танкера відповідають значення абсолютної похибки $\pm 1\text{-}2\%$ [82].

Розподіл тиску на газовий потік всередині вантажного приміщення танкера і його значення на виході вимірювалося з використанням манометрів типу PTSXR, виробник ATP Messtechnik GmbH, Німеччина. Цей клас манометрів характеризується вибухобезпечною конструкцією.

У відповідності з паспортними характеристиками фірми виробника цей прилад в межах робочих температур навколишнього середовища від -10°C до $+70^{\circ}\text{C}$ має діапазон зміни абсолютної похибки вимірювань величини тиску від 0,03% до 0,5%. Наведений діапазон зміни похибки відповідає вимірам величини тиску інертного газу і повітря всередині вантажного танка судна в межах від 0,3 Па до 600 кПа [59].

Величина статичного тиску всередині вантажного приміщення танкеру контролювалася з використанням U-образного диференційного манометру. В якості робочої рідини використовувалася дистильована вода. Підключення скляного манометру було виконано за двома гнучкими лініями - з подволоку і підлоги вантажного приміщення.

Відповідно до рекомендацій роботи [53] абсолютна похибка вимірювань U-образного диференційного манометру може бути знайдена з виконанням наступних умов: похибка рисок шкали манометра не повинна перевищувати 0,4 мм; зміна рівня води в трубці, тобто похибка, що викликається змочуванням скляних стінок робочої рідиною не повинна перевищувати значення 0,2 мм; в разі відхилення манометру від вертикального положення необхідно враховувати, що кожен градус нахилу призводить до отримання додаткової похибки вимірювань в 0,03%.

При проведенні вимірювань статичного тиску абсолютна похибка використаного U-образного диференційного манометру не перевищувала величину 1 мм.

Температура двофазного потоку інертного газу і повітря всередині вантажного приміщення, а також в вихідному отворі вимірювалася за допомогою цифрового п'ятиканального індикатора показників вимірювань термопар типу NiCr-Ni (нікельхром-нікель). Тип приладу M2-Tур S, виробник ATP Messtechnik GmbH, Німеччина. Термопари монтувалися на стінках вантажного приміщення і на його подволоку в області вихідного отвору. Їх закладення проводилось в керамічні захисні оболонки.

У відповідності з паспортними характеристиками фірми виробника цей цифровий індикатор температури в межах робочих температур навколишнього середовища від -20°C до $+80^{\circ}\text{C}$ має абсолютну похибку вимірювань величини температури $<\pm 1^{\circ}\text{C}$ [62]. Наведена похибка відповідає вимірам величини температури в межах її зміни від -50°C до 1768°C .

Під час проведення експериментів для всіх отриманих результатів параметрів (температури, тиску і т. і.), що вимірювались, знаходилися значення відносної дисперсії. З використанням її числових значень виконувалася оцінка ступеня вірогідності побудови графічних залежностей. За рахунок високої якості використаної вимірювальної апаратури діапазон зміни дисперсії в кожній серії вимірювань незалежно від вимірюваної величини знаходився в діапазоні від $1 \cdot 10^{-6}$ до $2,3 \cdot 10^{-5}$.

Дисперсія температури в ідентичній серії вимірювань розраховувалася з використанням рівняння виду

$$D(t) = \frac{1}{3} \left(\frac{t_{\max} - t_{\min}}{\left(\frac{t_{\max} + t_{\min}}{2} \right)} \right)^2. \quad (4.2)$$

Відповідно до існуючого правила [13, 22, 28, 38, 42, 47, 49] обробки результатів експериментів під час оцінки похибки вимірювань вона бути відкинута якщо її значення становить величину менше 0,05%.

Таким чином максимальна абсолютна похибка вимірювань по кожному параметру, що характеризує або що впливає на процес інертизації вантажного танка, склала значення, які наведені в таблиці 4.1. На підставі цих значень можливо стверджувати, що оскільки середньоквадратична похибка проведених вимірювань знаходилася в межах менше 2,5%, всі використані кошти виміру були обрані правильно. Всі результати вимірювань, які були отримані в ході експериментів є вірогідними, а висновки, що були отримані на їх основі є коректними.

Таблиця 4.1

Оцінка похибки результатів вимірювань

Параметр, одиниця виміру	Похибка	Дисперсія
Лінійний розмір, м	0,002 %	$1 \cdot 10^{-6}$
Температура, °C	0,2 %	$2,14 \cdot 10^{-6}$
Концентрація компонент інертного газу, %	2,0 %	$14 \cdot 10^{-5}$
Тиск, Па	0,5 %	$11 \cdot 10^{-6}$

Таким чином максимальна абсолютна похибка вимірювань по кожному параметру, що характеризує або що впливає на процес інертизації вантажного танка, склала значення, які наведені в таблиці 4.1. На підставі цих значень можливо стверджувати, що оскільки середньоквадратична похибка проведених вимірювань знаходилася в межах менше 2,5 %, всі використані кошти виміру були обрані правильно. Всі результати вимірювань, які були отримані в ході експериментів є вірогідними, а висновки, що були отримані на їх основі є коректними.

4.5 Висновки по розділу 4

1. Прискорення процесу інертизації вантажних танків нафтоналивних танкерів передбачає проведення дослідницьких робіт в застосуванні технології вдосконаленої подачі інертного газу всередину вантажного танка. З цієї причини для її реалізації була розроблена методика проведення експериментальних досліджень. Результати, що отримуються на її основі характеризуються найменшою похибкою і володіють великою інформативністю.

2. Для прискорення процесу інертизації вантажного танка були використані три технологічні схеми. Найбільша ефективність була отримана в схемі з п'ятьма точками подачі струменів інертного газу. У ній використовувалися насадки, що створюють кут розкриття конусу факелу струменя інертного газу в 30° .

3. Використання вдосконаленої примусової подачі інертного газу всередину вантажного танка з п'яти точок подачі призводить до скорочення часу, що витрачається на інертизацію вантажних танків нафтоналивного танкера перед отриманням нового вантажу.

У процентному співвідношенні скорочення часу процесу інертизації вантажного танка при переході від стандартної до вдосконаленої схеми подачі інертного газу склало 56,47%.

4. За аналогією з процесом зміни концентрації кисню всередині вантажного танка також спостерігається стабілізація температури повітря і інертного газу. При порівнянні результатів вимірювань температури на виході з танка при стандартній і поліпшеній інертизаціях встановлено, що стабілізація в останньому випадку також настає раніше. Температурний градієнт, що становив -17°C досягався за час менший на 38,18 % в порівнянні зі стандартною операцією інертизації вантажного танка.

5. На підставі оцінки величин похибки і дисперсії всіх виміряних величин можна стверджувати, що всі використані засоби вимірювання були обрані правильно, результати, які були отримані в ході експериментів є достовірними, а висновки отримані на їх основі є коректними.

РОЗДІЛ 5.

РЕКОМЕНДАЦІЇ ЩОДО ВДОСКОНАЛЕННЯ СИСТЕМИ ПОДАЧІ ІНЕРТНОГО ГАЗУ ДЛЯ ПОЛІПШЕННЯ ПРОЦЕСУ ІНЕРТИЗАЦІЇ ВАНТАЖНОГО ТАНКА

5.1 Вибір матеріалів для вдосконалення системи подачі інертного газу

При виборі матеріалів, які можуть бути використані для вдосконалення системи подачі інертного газу, слід враховувати комбінацію їх вартості і ступеня впливу фізико-хімічних властивостей на термін подальшої безаварійної експлуатації. Правильний вибір матеріалів може в подальшому надавати досить сильний вплив на експлуатаційні характеристики, як окремих елементів, так і всієї судової системи інертних газів в цілому [8, 27].

Для вдосконалення основних металевих елементів судової системи інертних газів вимоги до матеріалів, що використовуються, повинні бути стандартними. Вони повинні:

- характеризуватися високими значеннями опору і зносостійкості по відношенню до механічних коливань і судових вібраційних навантажень, що виникають під час роботи судна;
- бути пасивними по відношенню до присутніх процесів окислювання і корозії;
- характеризуватися високою стійкістю до температурних навантажень, що виникають в ході роботи.

Основним елементом, який необхідно встановити під час модернізації судової системи інертних газів, є вузол підготовки дизельного палива. Використання всередині його робочої камери процесів кавітації підумовлює високу зносостійкість і міцність всіх робочих поверхонь.

Мінімальне навантаження, при якому може статися розрив циліндричних елементів його корпусу може бути оцінено за виразом

$$F = k_1 \delta^2, \quad (5.1)$$

де k_1 - емпіричний коефіцієнт, який береться з довідкової літератури в залежності від типу матеріалу, з якого виготовлений циліндричний елемент; δ - товщина стінки, мм.

На підставі значення мінімального навантаження визначається така характеристика, як робоча міцність. Вона являє собою найбільшу експлуатаційне навантаження, при якому протягом великого періоду часу не буде спостерігатися порушення цілості конструкції вузла диспергування. Її можна приймати, як рівномірно розподілену по довжині. У цьому випадку запас міцності на розрив можна визначити як

$$P = \frac{F}{k_2}, \quad (5.2)$$

де F - розривне зусилля, Н; k_2 - коефіцієнт запасу міцності (для суден водного транспорту його значення складають від 6 до 9).

Номенклатура матеріалів, які можуть бути використані при виробництві вузла диспергування палива є дуже великою. При їх виборі необхідно враховувати тільки два основних показника - вартість і тривалість експлуатації.

При виробленні циліндричних ділянок робочої камери вузла диспергування найбільш якісним рішенням можуть виступати ті вязкопластичні синтетичні пластмаси, які не реагують з нафтопродуктами. До них відносяться поліамідні, поліефірні та поліпропіленові полімери. Їх температурний діапазон експлуатації обмежений значенням $+60^\circ\text{C}$.

Головним критерієм у виборі синтетичних пластмас повинні бути здатність їх опору під час стрибків тиску на їх поверхні в разі руйнування парових бульбашок. Якщо вважати, що паровий пухирець має сферичну форму то швидкість руху ударної хвилі в момент руйнування бульбашки на поверхні матеріалу може бути оцінена за виразом [20]

$$V = -\frac{P}{4\nu\rho} R, \quad (5.3)$$

У чисельному еквіваленті для пухирця радіусом 3 мм при тиску всередині робочої камери вузла диспергування $P = 45000$ Па (0,45 атм.), при густині дизельного палива $865,4$ кг/м³ і в'язькості $4,8 \cdot 10^{-4}$ м²/с (при $t=40$ °С) досягається швидкість схлопування порядку $V = 81,24$ м/с.

У номенклатурі поліамідних пластмас, що виробляються промисловістю, найбільш якісним є найлон. Його основними властивостями є: гігроскопічність 0,03 - 0,04 %, а питома вага дорівнює $1,14$ г/см³.

У номенклатурі поліефірних пластмас, що виробляються промисловістю, найбільш якісним є дакрон. Його основними властивостями є: гігроскопічність 0,47-0,52%, а питома вага дорівнює $1,37$ г/см³.

У номенклатурі поліпропіленових пластмас, що виробляються промисловістю, найбільш якісним є тіптолен. Його основними властивостями є: гігроскопічність 0,01-0,02%, а питома вага дорівнює $0,91$ г/см³.

Для виготовлення соплових напрямкових насадок, які встановлюються в нижній частині вантажного танка, рекомендується використання нержавіючої сталі або низьковуглецевої сталі покритою двокомпонентною епоксидною фарбою, або пористої металокераміки з покриттям на основі нікелю і алюмінію [89].

Для роздаткового трубопроводу інертного газу на днищі вантажного танка можливо використання гнучного трубопроводу з термостійкої

(неопренової) гуми армованого сталевим спіраллю стійкого до високих температур, хімічних речовин і абразивного впливу.

Для з'єднання між собою роздаткових трубопроводів та з основною магістральною лінією рекомендується використання механічних роз'ємних з'єднувальних деталей (фланці, з'єднувальні муфти та ін.).

Робота всіх трубопроводів і компенсуючих елементів магістрального трубопроводу в системі інертних газів танкера повинна допускати можливість їх температурної деформації в поздовжньому напрямку.

Зростання довжини труби при температурній деформації можна розрахувати наступним чином

$$\Delta l = \alpha \Delta T L, \quad (5.4)$$

де Δl - приріст довжини, м; α - коефіцієнт теплового лінійного розширення матеріалу труби, $^{\circ}\text{C}^{-1}$; ΔT - різниця між максимальною і мінімальною температурами трубопроводу, $^{\circ}\text{C}$; L - довжина трубопроводу, м.

Зростання температури буде також призводити до виникнення поздовжніх зусиль. Для випадку, коли не враховується компенсація температурних деформацій поздовжні зусилля можуть бути знайдені за виразом

$$N_t = \alpha \Delta T E_0 F, \quad (5.5)$$

де N_t - поздовжні зусилля, Н; E_0 - модуль пружності матеріалу труби, МПа; F - площа поперечного перерізу стінки труби, м^2 .

При проведенні проектувальних і ремонтних робіт з вдосконалення суднової системи інертних газів температурні напруження потрібно враховувати у всіх секціях магістрального і роздаткового трубопроводів. Це потрібно робити незалежно від значень їх довжин [67].

Проведення робіт, що пов'язані з вдосконаленням системи інертних газів судна, завжди необхідно виконувати з використанням відповідних документів:

1. Проектних - будівельних і компоновальних.
2. Нормативних –постановних.
3. Директивних - інструкцій і правил експлуатації.

До директивних документів також відносять креслення, технологічні схеми, посадові і нормативні інструкції для суднового устаткування і трубопроводів подачі інертного газу.

5.2 Методика оцінювання концентрації кисню в вантажному танку нафтоналивного танкера при роботі системи його інертизації

В даний час, в технології, що використовується на танкерах для контролю концентрації кисню в просторі вантажного танка існує ряд недоліків. Одним з головних недоліків є замірювання показань на виході з танка в одній точці (створі). Значення концентрації кисню, що отримується в цьому випадку, не завжди відповідає її значенню всередині танка і не може гарантувати високу якість контролю процесу його інертизації. З цієї причини була розроблена нова методика вимірів для проведення на танкерах аналізу складу мікроатмосфери вантажного танка, що одержується в ході подачі інертного газу. Головна зміна в порівнянні з існуючими танкерами в цій методиці полягає в:

- розстановці вимірювальних створів по висоті танка;
- обробці даних, що використовуються в роботі газоаналізатора і контролі на їх основі часу інертизації танка і якості самого процесу.

Основними положеннями розробленої методики є наступні:

1. Вимірювання концентрації кисню необхідно виробляти дискретно. При використанні розробленої системи поліпшеної інертизації вантажного

танка час між вимірами в усіх вимірювальних створах повинен бути в діапазоні від 5 до 10 хвилин. Менші значення часового інтервалу відповідають вантажним танкам з невеликими обсягами до 500 м³, а великі відповідно при обсягах танка від 500 до 1000 м³.

2. В ході процесу інертизації, вимірювання значень величини концентрації кисню повинні проводитися по всій висоті вантажного приміщення танка, а не тільки в отворі на виході з його верхньої частини.

3. Розташування першого створу для вимірювання величини концентрації кисню в повітрі повинно відповідати половині висоти вантажного танка.

4. Розстановка створів для відбору проб повітря з простору вантажного танка повинна проводитися поблизу всіх його чотирьох кутових зон і в центральній точці його поперечного перерізу. Винятком є верхнє поперечний переріз, в якому через наявність подволоку вантажного танка вимірювання концентрації проводити не потрібно. У цьому перетині вимірювання концентрації повітря проводиться тільки в одній точці-безпосередньо в випускному отворі.

5. Всі значення концентрації кисню, що виміряні поблизу стінок вантажного танка, необхідно усереднювати. Ця вимога викликана характерним видом епюри швидкості всередині танка. Як показано в розділі 2.1 епюра швидкості характеризується своєю симетричністю щодо вертикальної віссі симетрії вантажного танка. Встановлення вимірювальних створів поблизу стінок повинно проводити на відстані 20 відсотків від величини, що дорівнює половині ширини або довжини танка.

6. Оскільки пристінкові значення градієнту швидкості є в силу високої циркуляції високими саме поблизу стінок (див. рис. 2.1-б) отримані чотири значення концентрації кисню повинні порівнюватися з п'ятим значенням, яке є відповідним ядру рухомого потоку на вертикальній віссі симетрії вантажного танка.

Показання можна вважати ідентичними якщо дотримується умова розбіжності усередненої величини концентрації з чотирьох стінок $C_{O_2}^c$ з її значенням в центральній точці площини вантажного приміщення $C_{O_2}^н$ на величину менше 3.0 %. Розрахунок необхідно проводити за стандартною формулою для визначення похибки

$$\frac{C_{O_2}^c - C_{O_2}^н}{C_{O_2}^c} < 3\% . \quad (5.6)$$

7. По висоті вантажного танка, який показано на рисунку 5.1 розстановка вимірювальних створів повинна виконуватися від середини вантажного танка до його вихідного перетину. Залежно від розмірів танкера і відповідно геометричних розмірів його вантажних танків встановлення створів необхідно здійснювати виходячи з правила, що на верхню половину вантажного танка (відлік йде від його середини) має припадати не менше чотирьох вимірювальних створів.

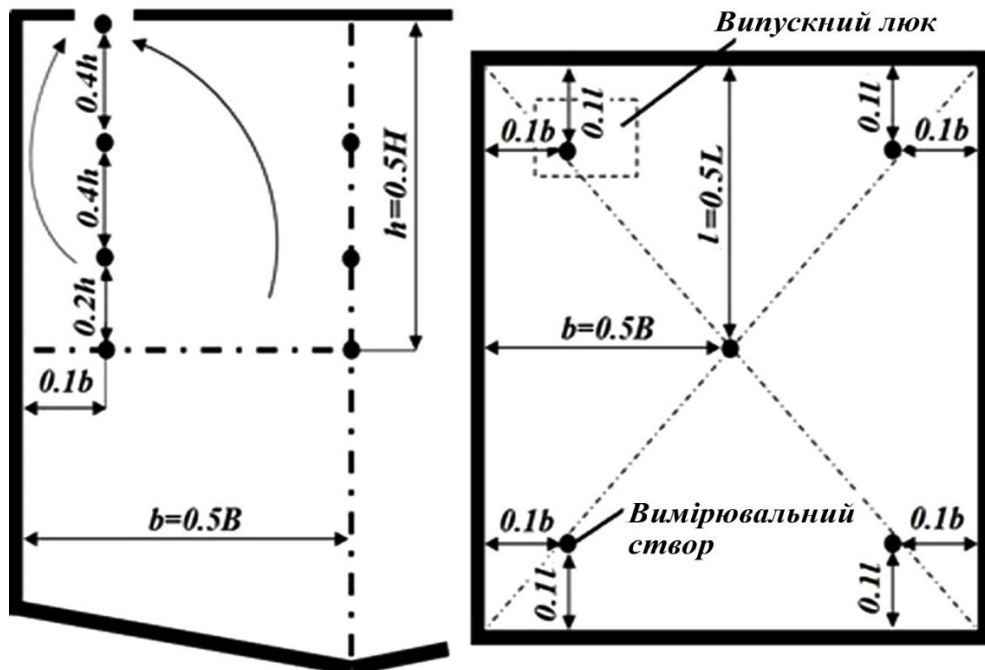


Рисунок 5.1 – Схема розташування створів для вимірювання концентрації кисню в вантажному танкі

Перші два створи повинні знаходитися в центральному і вихідному поперечних перетинах вантажного танка, а два інших на відстанях, що покривають відповідно 20 і 40 відсотків від половини його висоти.

Схема розташування вимірювальних створів для оцінки величини концентрації кисню всередині вантажного танка з основними відносними розмірами показана на рисунку 5.1. Ліва частина креслення відповідає вертикальному перетину половини поперечної площини вантажного танка. Права частина креслення відображає поздовжній перетин поперечної площини вантажного танка. На схематичному кресленні для габаритних розмірів вантажного танка і додаткових розмірів для розстановки вимірювальних створів використані наступні позначення: H - висота вантажного танка, h - половина висоти вантажного танка, B - ширина вантажного танка, b - половина ширини вантажного танка, L - довжина вантажного танка, l - половина довжини вантажного танка.

5.3 Рекомендації до використання роздавальних трубопроводів в системі інертних газів танкера

Усередині вантажних танків нафтоналивних танкерів відповідно до нормативних документів забороняється стаціонарне розміщення додаткових технічних пристроїв [27, 36]. У зв'язку з цим, у технологічній схемі, що використовується для подачі інертного газу на днище вантажного танка повинні використовуватися гнучкі армовані трубопроводи з сопловими насадками на виході. Як показано на рисунку 5.2 встановлення гнучкого трубопроводу у верхній частині вантажного приміщення можливо здійснювати через розташовані на палубі люкові отвори.

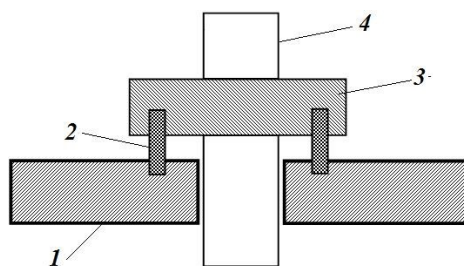


Рисунок 5.2 – Схема введення гнучкої труби до вантажного танка

1 - палуба; 2 - центрові стрижні; 3 - муфтове з'єднання;

4 - гнучкий роздатковий трубопровід

Кількість отворів на палубі має відповідати числу роздаткових трубопроводів. Їх розташування повинне визначатися технологічною схемою, що використовується для подачі інертного газу (див. підрозділ 4.2).

Усередині вантажного танка, довжина на яку повинен бути опущений гнучкий трубопровід подачі інертного газу, тобто фактично глибина занурення соплової насадки повинна регулюватися за допомогою розташованого над вхідним отвором стандартного циліндричного затискувача - муфтового з'єднання.

Для центрування внутрішньої і зовнішньої частини гнучкої труби муфтове з'єднання повинно містити напрямкові стрижні. Кожен гнучкий трубопровід уздовж всієї своєї довжини повинен містити розмітку з кроком, що дорівнює 1 м. За рахунок її використання при опусканні роздаткових трубопроводів всередину вантажного танка буде виконуватися поточний контроль і синхронізація розташування насадок подачі інертного газу в одній горизонтальній площині.

Підключення гнучких труб до суднової магістралі, що підводить інертний газ на палубі танкера необхідно проводити за допомогою стандартних фланцевих з'єднань. Як видно на рисунку 5.3 підключення роздаткових трубопроводів до магістралі можливо здійснювати по типу гребінки з паралельним з'єднанням.

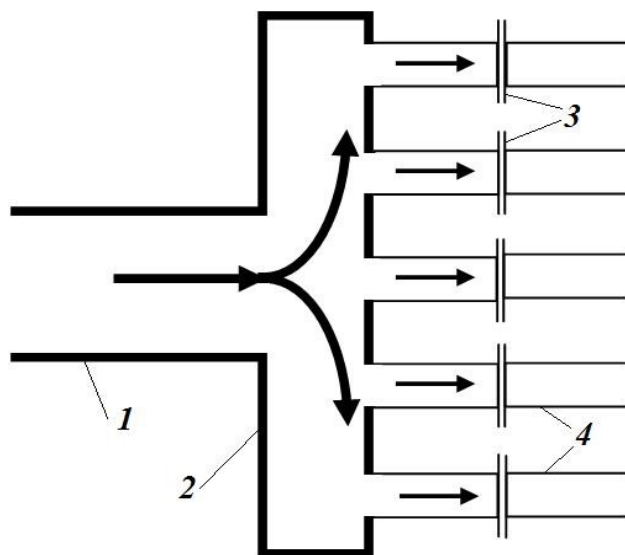


Рисунок 5.3 – Схема з'єднання магістралі інертного газу
з роздатковими трубопроводами

1 – магістраль підведення інертного газу; 2 - гребінка; 3 – фланцеве
з'єднання; 4 - гнучкі роздаткові трубопроводи

Перевагою муфтового з'єднання для встановлення трубопроводу в вантажний танк є технічно проста можливість впливати на швидкість інертизації вантажного танка за рахунок глибини розташування соплових насадок. У міру заповнення інертним газом внутрішнього простору вантажного танка гнучкі трубопроводи буде можливо поступово піднімати. Синхронне виконання цієї операції для всіх роздаткових трубопроводів одночасно буде призводити до інтенсифікації дифузійного переносу по висоті вантажного танка і, як наслідок, до скорочення часу витіснення повітря (інертизації вантажного танка).

Індикатором необхідності підйому гнучких труб повинні служити показання концентрації кисню, взяті з створів, що знаходяться на різних висотах вантажного танка. Приклад номограми, що показує вплив концентрації кисню на виході з вантажного танка (із загальною висотою 12 метрів) на глибину занурення роздаткових трубопроводів інертного газу показаний на рисунку 5.4.

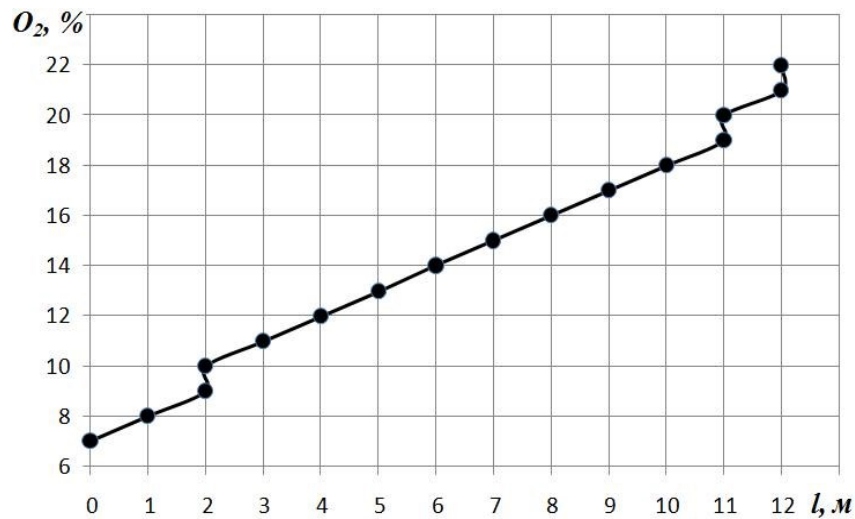


Рисунок 5.4 – Глибина занурення в вантажний танк роздаткових трубопроводів інертного газу

5.4 Рекомендації з виготовлення, монтажу та обслуговування вузла підготовки палива для генератора інертних газів

Виготовлення та монтаж вузла підготовки палива, що працює з використанням процесу кавітації, передбачає виконання ряду правил, дотримання яких в подальшому буде впливати на тривалість і якість його роботи. У цьому випадку головна вимога, яке завжди повинна враховуватися полягає в його герметичності. Наявність локальної області низького тиску при розгерметизації всього вузла підготовки палива може призвести до виникнення вибуху, тобто до виникнення аварійної ситуації на судні.

Виготовлення та монтаж вузла диспергування палива необхідно виконувати під час проведення ремонтних робіт і з залученням лише кваліфікованих механіків, у яких є відповідний допуск для роботи з обладнанням, що працює під тиском. Його подальша експлуатація також повинна виконуватися кваліфікованим персоналом - механіками з відповідними документами, які підтверджують їх кваліфікацію.

Допуски на всі лінійні розміри L при виготовленні не повинні перевищувати величину $L_{-0.1\%}^{+0.2\%}$. Вони повинні також контролюватися під час проведення ремонтно-профілактичних робіт.

В силу специфічних особливостей використання процесу кавітації, робота вузла диспергування палива висуває підвищені вимоги до міцності всіх механічних з'єднань. У зв'язку з цим складання і пуско-налагоджувальні роботи необхідно виконувати тільки під час судноремонтного періоду.

Підключення вузла диспергування палива до основної паливної магістралі суднової системи інертних газів необхідно виконувати за допомогою стандартних фланцевих (з використанням посадкового кільця) або муфтових різьбових з'єднань. Такий варіант збірки виключає можливість розбіжності віссі симетрії магістральної лінії подання та лінії відведення палива з робочою ділянкою вузла диспергування.

При остаточному встановленні вузла диспергування палива на магістральній лінії палива системи інертних газів судна необхідно виконати пуско-налагоджувальні роботи. Їх головною метою є перевірка міцності та герметичності. Ці роботи повинні виконуватися з використанням показаної на рисунку 5.5 за кільцьованої ділянки паливної мережі 1-7, що містить

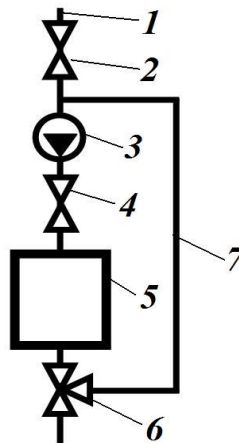


Рисунок 5.5 – Лінія тестування камери диспергування палива

1 - основна паливна магістраль; 2, 4 - вентиль; 3 - нагнітач; 5 - вузол диспергування палива; 6 - триходовий вентиль; 7 - байпасна лінія.

паливний насос 3, вузол диспергування 5, два стандартних вентиля 2, 4 і один триходовий вентиль 6. Закільцьована ділянка повинна бути частиною суднової лінії 1 вироблення інертних газів.

Для проведення пуско-налагоджувальних випробувань рекомендується наступне: основна паливна магістраль повинна бути заповнена паливом при закритих вентилях 2 і 4. Триходовий вентиль 6 відкривається в положення, при якому потік надалі буде надходити в байпасну лінію 7. Потім, вентиль 2 відкривається і проводиться запуск нагнітача 3. Для запобігання гідравлічного удару у системі при працюючому нагнітачі 3 виконується плавне відкриття вентиля 4. По мірі зростання тиску всі місця з'єднань повинні бути перевірені на відсутність протікання і якісну роботу запірно-регулювальної арматури. За допомогою вимірювального обладнання (індикаторів вакууму) необхідно переконатися у виникненні зони кавітації всередині вузла диспергування палива 5.

Тривалість роботи системи під вакууметричним тиском повинна становити не менше 30 хвилин. Величина вакууметричного тиску повинна перевищувати значення робочого тиску на величину від 20% до 30%.

Під час використання вузла підготовки палива його експлуатаційні характеристики будуть змінюватися з часом. Головними причинами цієї зміни можуть бути знос робочих поверхонь.

Двома головними індикаторами зносу робочих поверхонь кавітаційної камери є:

- сильна вібрація зі змінною амплітудою під час роботи вузла диспергування палива;
- сильна осциляція в показаннях величини вакууметричного тиску всередині робочого каналу (в області зони кавітації).

Показником зносу поверхні циліндричної робочої камери необхідно вважати зміну співвідношення внутрішнього діаметра до зовнішнього (зменшення товщини стінки) на величину більше 10%.

Для запобігання аварій пов'язаних зі зносом поверхонь робочої камери необхідно з інтервалом не менше одного разу на три місяці або не менше одного разу за 300 годин роботи виробляти їх візуальний огляд. Під час інспекційного огляду необхідно вимірювати за допомогою нутрометра товщини стінки в п'яти і більше місцях. При наявності зносу більше 10% циліндричну ділянку робочої камери необхідно замінити новою.

У тому випадку, коли суднова система інертних газів не експлуатувалася тривалий період часу (більше 1 місяця) перед її запуском вузол диспергування палива повинен бути протестований в описаному вище режимі пуско-налагоджувальних робіт.

Управління роботою системи інертних газів судна повинно здійснюватися за допомогою інформаційних технологій, реалізованих у вигляді програмного забезпечення на штатному судновому комп'ютері. Управління має завжди здійснюватися в ручному режимі з використанням візуалізації основних робочих параметрів і характеристик процесу в графічному і цифровому вигляді. Поточкові дані, що відображаються на моніторі, повинні містити розрахункову інформацію, яка дозволяє прогнозувати процес інертизації вантажних танків і аналогічні дані, які надходять з вимірювальних приладів. До таких даних при інертизації вантажних танків судна відносяться: час процесу; величина концентрації кисню всередині вантажного танка; температура потоку у вихідному отворі; витрата інертного газу; розрахунковий час до закінчення операції інертизації.

Передавання даних від засобів вимірювання і контролю (обладнаних відповідним інтерфейсом: HART-Master, HART OPC-Server, і т. і.) повинна здійснюватися з використанням HART (Highway Addressable Remote Transducer Protocol) протоколу. Такий протокол у застосуванні до суден забезпечує надійність передання даних, можливість налаштування і регулювання діапазонів вимірювальних датчиків; захищеність від радіо, електромагнітних, вібраційних і акустичних перешкод [68].

Перетворення аналогового сигналу від засобів вимірювання в цифровий сигнал на вході в судновий комп'ютер необхідно виконувати за допомогою HART-модем. Цей модем повинен бути включений в єдину бездротову судову мережу з усіма датчиками. Його з'єднання з судовим комп'ютером має бути реалізовано з використанням RS-232 інтерфейсу.

У тому випадку, коли на судні передбачається використання датчиків і приладів із дротовим під'єднанням необхідно використовувати додаткові SWA (Smart Wireless Adapter) адаптери. Вони будуть виконувати функцію сполучення з судовою бездротовою мережею [88].

5.4 Висновки по розділу 5

1. При виготовленні циліндричних ділянок робочої камери вузла диспергування палива найбільш якісним рішенням може бути використання синтетичних пластмас, які не реагують з нафтопродуктами. До них відносяться поліамідні (найлон), поліефірні (дакрон) і поліпропіленові (тіптолен) полімери.

2. Для виготовлення соплових напрямкових насадок для подачі інертного газу рекомендується використання нержавіючої сталі або низьковуглецевої сталі з покриттям двокомпонентною епоксидною фарбою, або пористої металокераміки з покриттям на основі нікелю і алюмінію.

3. Для роздаткового трубопровіда інертного газу на днищі вантажного танка можливо використання гнучного трубопровіда з термостійкої (неопренової) гуми армованого сталеву спіраллю стійкого до високих температур, хімічних речовин і абразивного впливу.

4. Розроблено нову методику вимірів для проведення на танкерах аналізу, одержуваного в ході подачі інертного газу складу мікроатмосфери вантажного танка. Її головна відмінність від стандартного методу проведення

аналізу на танкерах полягає в: розстановці вимірювальних створів по висоті танка; обробці даних, що використовуються в роботі газоаналізатора і контролі на їх основі часу інертизації танка і якості самого процесу.

5. Інертизація вантажних танків судна повинна бути заснована на ручному контролі в поєднанні з інформаційними технологіями на основі спеціалізованого програмного забезпечення.

Бездротова передача даних від засобів вимірювання і контролю повинне здійснюватися з використанням HART протоколу, що забезпечує надійність передачі даних при повній захищеності від радіо, електромагнітних, вібраційних і акустичних перешкод.

Перетворення аналогового сигналу від засобів вимірювання в цифровий сигнал на вході в судновий комп'ютер необхідно виконувати за допомогою HART-модему. Він повинен бути включений в єдину бездротову мережу з усіма датчиками. Його з'єднання з судновим комп'ютером має бути реалізовано з використанням RS-232 інтерфейсу.

ВИСНОВКИ

З 1 січня 2016 року система інертних газів повинна бути встановлена на нафтоналивних танкерах дедвейтом від 8000 тонн та більше. Таким чином кількість суден, для яких інертизація вантажних танків є обов'язковим, значно збільшилася. Як наслідок, судноплавні компанії повинні витрачати додаткові кошти на паливні ресурси, які витрачаються для вироблення димових (інертних) газів, а також зазнають додаткових збитків через простої суден під час інертизації вантажних танків.

Принцип роботи системи інертних газів нафтоналивного танкера заснований на спалюванні дизельного палива або важкого палива в генераторі інертного газу. Продукти згоряння, що отримуються після очищення і охолодження направляються в вантажні танки. Вони витискують повітря, в результаті чого концентрація кисню знижується до значення у 8 %. В цьому випадку мікросфера всередині вантажного танка вважається пожеже- та вибухобезпечною.

Аналіз причин аварій, що виникають в системах інертних газів на танкерах, показав, що найбільш часто, проблеми, що виникають на судах пов'язані з технічними недоліками системи інертизації. Їх усунення можливо виконати за рахунок модернізації системи підготовки палива та вдосконалення подачі збільшення швидкості процесу масообміну повітря і інертного газу у вантажному танку судна.

Дисертаційне дослідження спрямоване на вирішення науково-прикладного завдання – підвищення економічної ефективності роботи нафтоналивних танкерів поліпшенням процесу інертизації їх вантажних танків (що призводить до скорочення періоду часу, необхідного для інертизації їх вантажних танків перед транспортуванням нового нафтового вантажу).

Головним науковим результатом дисертаційної роботи є поліпшення процесу інертизації вантажних танків нафтоналивних танкерів (скорочення періоду часу, потрібного для зниження концентрації кисню всередині вантажних танків) за рахунок вдосконаленої подачі інертного (димового) газу.

Основні наукові результати дослідження, отримані вперше:

- скорочення тривалості процесу інертизації вантажних танків нафтоналивного танкера димовими газами незалежно від конструкції і дедвейту судна забезпечується за рахунок вдосконалення подачі інертного (димового) газу всередину вантажного танка;
- наявність динамічно стійких структур суміші повітря і інертних (димових) газів в кутових зонах вантажних танків нафтоналивних танкерів;
- в порівнянні зі стандартною операцією інертизації використання вдосконаленої подачі інертних (димових) газів призводить до більш швидкої стабілізації величин кінцевої концентрації кисню і температури суміші повітря з інертними (димовими) газами всередині вантажних танків нафтоналивного танкера.

Підвищення економічної ефективності роботи нафтоналивного судна за рахунок поліпшення процесу інертизації його вантажних танків забезпечується наступним:

- економія паливних ресурсів, які витрачаються для вироблення димових газів, потрібних для інертизації вантажних танків нафтоналивного танкера;
- скорочення простою судна під час підготовки його вантажних танків до транспортування нового нафтового вантажу.

Практичне значення отриманих результатів полягає в наступному:

- розроблена схема подачі інертного (димового) газу в вантажні танки нафтоналивного танкера, яка не передбачає заміну основних конструктивних елементів суднової системи інертних газів;
- вдосконалена технологія інертизації вантажних танків димовими газами, яка дозволяє скоротити час процесу інертизації танкера на величину 50 %;
- розроблений новий метод вимірювання зміни концентрації кисню в ході процесу інертизації вантажних танків нафтоналивного танкера.

Також слід зазначити, що скорочення періоду потрібного для інертизації вантажних танків призводить до пропорційного зниження емісії інертних (димових) газів в атмосферу, що, безумовно, призведе до зниження забруднення навколишнього середовища нафтоналивними танкерами під час їх експлуатації.

Вдосконалений метод подачі димових газів, який призводить до поліпшення процесу інертизації вантажних танків нафтоналивних танкерів, є прикладом застосування наукових теоретичних знань та досліджень для підвищення ефективності експлуатації нафтоналивних суден морського та річкового транспорту.

ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Арнольд Л. В. Техническая термодинамика и теплопередача / Л. В. Арнольд, Г. А. Михайловский, М. В. Селиверстов. – Москва : Высшая школа, 1979. – 446 с.
2. Андерсон Д, Вычислительная гидромеханика и теплообмен : в 2 т. / Д. Андерсон, Дж. Таннехилл, Р. Плетчер. – Москва : Мир, 1990. – Т.1. – 1990. – 384 с. ; Т.2. – 1990. – 392 с.
3. Аржаников Н. С. Аэродинамика / Н. С. Аржаников, В. Н. Мальцев. – Москва : Гос. Оборонгиз, 1956. – 484 с.
4. Баскаков С. П. Основы безопасной эксплуатации танкера / С. П. Баскаков, А. Г. Конаков, С. Ю. Развозов. – СПб. : Изд-во ГУМРФ им. адм. С. О. Макарова, 2015. – 804 с.
5. Белов И. А. Моделирование турбулентных течений : учебное пособие / И. А. Белов, С. А. Исаев. – СПб. : Балт. гос. тех. ун-т., 2001. – 108 с.
6. Бражнік І. Д. Изменение рабочих характеристик системы инертизации танкера за счет принудительной подачи газов / І. Д. Бражнік // Науковий вісник Херсонської державної морської академії. Науковий журнал. – 2019. – № 1(20). – Херсон: ХДМА. – С. 4-11.
7. Бражник И. Д. Модернизация процесса вентиляции грузовых трюмов танкера с помощью системы инертных газов / И. Д. Бражник // Вчені записки Таврійського національного університету ім. В.І. Вернадського. Серія: «Технічні науки». – 2019. – Т. 30(69) – № 5. – С.129-133.
8. Бражник И. Д. Модернизация процесса инертизации грузовых танков на танкерах / И. Д. Бражник, М. А. Коллегаев, А. В. Малахов, А. В. Кирилс, Б. А. Гарагуля // Матеріали ХІ Міжнародної науково-технічної конференції «Інновації в суднобудуванні та океанотехніці» 24-25 вересня 2020. Частина І. –Миколаїв. – НУК ім. адм. Макарова – С. 158-161.
9. Бражник И. Д. Совершенствование системы подачи инертных газов на танкерах / И. Д. Бражник, М. А. Коллегаев // Матеріали науково-технічної

- конференції молодих дослідників «Суднові енергетичні установки: експлуатація та ремонт» 14.12.2017. – Одеса. – НУ «ОМА». – С. 150-152.
10. Букетов А.В. Використання модифікованих епоксикомпозитів з поліпшеними теплофізичними властивостями для відновлення суднових теплообмінних апаратів в умовах експлуатації судна / А.В. Букетов, Р.Ю. Негруца, Д. Г. Круглий, В. М. Яцюк // Науковий вісник ХДМА. – 2018. – № 2 (19). – С. 131-139.
 11. Гидравлика, гидромашины и гидроприводы : изд 2-е перераб. / Т. М. Башта, С. С. Руднев, Б. Б. Некрасов и др. – Москва : Машиностроение, 1982 – 423 с.
 12. Гидрогазодинамика и процессы тепломассопереноса : Сб. науч. тр. / Ред. кол. Н. Д. Коваленко. – Киев : Наукова думка, 1986. – 152 с.
 13. Гмурман В. Е. Теория вероятностей и математическая статистика : изд 7-е, стер. / В. Е. Гмурман. – Москва : Высшая школа, 1999. – 479 с.
 14. Гольдштик М. А. Вязкие течения с парадоксальными свойствами / М. А. Гольдштик, В. Н. Штерн, Н. И. Яворский. – Новосибирск : Наука, Сиб. Отд-ние, 1989. – 336 с.
 15. Гуревич Д. Ф. Расчет и конструирование трубопроводной арматуры / Д. Ф. Гуревич. – Москва : ЛКИ, 2008. – 480 с.
 16. Гусейнов Д. А. Технологические расчеты процессов переработки нефти / Д. А. Гусейнов, Ш. Ш. Спектор, Л. З. Вайнер. – Москва : Химия, 1964. – 305 с.
 17. Дейч М. Е. Гидрогазодинамика / М. Е. Дейч, А. Е. Зарякин. – Москва : Энергоатомиздат, 1984. – 384 с.
 18. Джалурия Й. Естественная конвекция: тепло- и массообмен / Й. Джалурия. – Москва : Мир, 1983. – 400 с.
 19. Емцев Б. Т. Техническая гидромеханика / Б. Т. Емцев. – Москва : Машиностроение, 1987. – 439 с.
 20. Забабахин Е. И. Кумуляция и неустойчивость / Е. И. Забабахин. – Снежинск : РФЯЦ—ВНИИТФ, 1998. – 112 с.

21. Завиша В. В. Судовые вспомогательные механизмы / В. В. Завиша, Б. Г. Декин. – Москва : Транспорт, 1974. – 392 с.
22. Зайдель А. Н. Погрешности измерений физических величин / А. Н. Зайдель. – Ленинград : Наука, 1985. – 112 с.
23. Колегаев М. А. Использование кавитации в судовых системах инертных газов / М. А. Колегаев, И. Д. Бражник // Матеріали міжнародної науково-технічної конференції «Транспорт: механічна інженерія, експлуатація, матеріалознавство (ТМІЕТ – 2017)» 21-22 вересня 2017. – Херсон. – ХДМА. – С. 78-79.
24. Колегаев М. А. Исследование процессов принудительной подачи инертных газов в грузовые помещения танкера / М. А. Колегаев, И. Д. Бражник // Матеріали науково-технічної конференції «Річковий та морський флот: експлуатація і ремонт» 22.03.2018-23.03.2018. – Одеса. – НУ «ОМА». – С. 132-137.
25. Колегаев М. А. Модернизация системы подачи инертных газов на танкерах / М. А. Колегаев, И. Д. Бражник // Матеріали науково-технічної конференції «Транспортні технології (морський та річковий флот): інфраструктура, судноплавство, перевезення, автоматизація» 16-17 листопада 2017. – Одеса. – НУ «ОМА». – С. 227-229.
26. Колегаев М. О. Обработка топлива в системе инертных газов танкера / М. О. Колегаев, И. Д. Бражник // Збірник тез доповідей IX Міжнародної науково-практичної конференції «Сучасні підходи до високоефективного використання засобів транспорту» 6-7 грудня 2018. – Ізмаїл. – ДІ НУ «ОМА». – С. 100-104.
27. Колегаев М. О. Технологічна схема модернізації системи подачі інертних газів у вантажні приміщення танкерів / М. О. Колегаев, І. Д. Бражник // Матеріали науково-технічної конференції «Морський та річковий флот: експлуатація і ремонт» 21.03.2019-22.03.2019. – Одеса. – НУ «ОМА». – С. 266-268.

28. Кринецкий И. И. Основы научных исследований / И. П. Кринецкий. – Киев : Техника, 1972. – 194с.
29. Лойцянский Л. Г. Механика жидкости и газа : 7-е изд., испр. / Л. Г. Лойцянский. – Москва : Дрофа, 2003. – 840 с.
30. Малахов А. В. Метод принудительной вентиляции трюмов на танкерах / А. В. Малахов, М. А. Колегаев, И. Д. Бражник // Вчені записки Таврійського національного університету ім. В. І. Вернадського. Серія «Технічні науки». – 2018. – Т. 29(68). – № 3. – С. 166-169.
31. Малахов А. В. Совершенствование эксплуатационных показателей системы инертных газов на танкерах / А. В. Малахов, М. А. Колегаев, И. Д. Бражник // Вісник Херсонського національного технічного університету. – 2018. – Вип. 2(65). – С. 27-34.
32. Малахов А. В. Управление процессом вентиляции трюмов танкера / А. В. Малахов, М. А. Колегаев, И. Д. Бражник, Р. Г. Гудилко, Д. О. Малахова // Матеріали VIII Міжнародної науково-практичної конференції «Інформаційні управляючі системи і технології» 25-25 вересня 2019. – Одеса. – ДУ «Одеська політехніка». – С. 232-234.
33. Малахов О. В. Характеристики процесса тепло-масопереносу в застосуванні до вентиляції інертними газами вантажних трюмів танкерів / О. В. Малахов, М. О. Колегаев, І. Д. Бражник, К. А. Ліхогляд // Суднові енергетичні установки: наук.-техн. зб. – 2019. – Вип. 39 – Одеса: НУ «ОМА». – С. 56-68.
34. Малахов О. В. Характеристики процесса тепло-масопереносу в застосуванні до вентиляції інертними газами вантажних трюмів танкерів / О. В. Малахов, М. О. Колегаєв, І. Д. Бражник, К. А. Ліхогляд // Збірник тез доповідей X Міжнародної науково-практичної конференції «Сучасні підходи до високоефективного використання засобів транспорту» 12-14 грудня 2019. – Ізмаїл. – ДІ НУ «ОМА». – С. 160-164.

35. Международная конвенция по охране человеческой жизни на море 1974 года (текст, измененный Протоколом 1988 года к ней, с поправками). – СПб.: ЗАО «ЦНИИМФ», 2008. – 984 с.
36. Международное руководство по безопасности для нефтяных танкеров и терминалов (5 издание). – СПб.: ЗАО «ЦНИИМФ», 2007. – 505 с.
37. Нагаяма К. Судовые системы инертных газов / К. Нагаяма // «Нихон дзосен гаккайся». – 1972. – No 515. – С. 294-299. – Реферативный Журнал «Водный Транспорт». – Москва : ВИНТИ, 1972 – No 10. – С. 63.
38. Нечаев Ю. И. Основы научных исследований / Ю. И. Нечаев. – Київ : Вища школа, 1983. – 160 с.
39. Новиков В. Т. Трубопроводная арматура / В. Т. Новиков. – Томск : Изд-во Томского политехнического университета, 2012 – 292 с.
40. Павленко В. Г. Основы механики жидкости / В. Г. Павленко. – Ленинград : Судостроение, 1988.–240 с.
41. Пейре Р. Вычислительные методы в задачах механики жидкости / Р. Пейре, Т. Тейлор. – Ленинград : Гидрометеиздат, 1986. – 352 с.
42. Румшицкий Л. З. Математическая обработка результатов эксперимента / Л. З. Румшицкий. – Москва : Наука, 1971. – 192 с.
43. Теория турбулентных струй : изд. 2-е, перераб. и доп. / Абрамович Г. Н., Гиршович Т. А., Крашенинников С. Ю., Секундов А. Н., Смирнова И. П. ; под ред. Г. Н. Абрамовича. – Москва : Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит-ры, 1984. – 718 с.
44. Теплофизические свойства технически важных газов при высоких температурах и давлениях : Справочник / В. Н. Зубарев, А. Д. Козлов, В. М. Кузнецов и др. – Москва : Энергоатомиздат, 1989. – 232 с.
45. Турбулентное смешение газовых струй / Абрамович Г. Н., Крашенинников С. Ю., Секундов А. Н., Смирнова И. П. : под ред. Г. Н. Абрамовича. – Москва : Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит-ры, 1974. – 272 с.
46. Уваров В. А. Методики расчёта количества тепла в уходящих газах / В. А. Уваров , С. В. Староверов, А. Ю. Феоктистов, А. И. Юдин //

Международный научно-исследовательский журнал. – Екатеринбург, 2015. – №8(39). – С. 89-91.

47. Уонг Х. Основные формулы по теплообмену для инженеров : Справочник / Х. Уонг – Москва : Атомиздат, 1979. – 216 с.
48. Чистяков С. Ф. Теплотехнические измерения и приборы / С. Ф. Чистяков, Д. В. Радун. – Москва : Высшая школа, 1972. – 392 с.
49. Шенк Х. Теория инженерного эксперимента / Х. Шенк. – Москва : Мир, 1972. – 381 с.
50. Al-Mutib A. N. Stability properties of numerical methods for solving delay differential equations / A. N. Al-Mutib // Journal of Computational and Applied Mathematics. – Amsterdam : Elsevier, 1984. – Vol.10. – Iss. 1. – P. 71-79.
51. Anand S. Heat Transfer Studies of Supercritical Water Flows in an Upward Vertical Tube / S. Anand, S. Suresh, D. Santhosh Kumar // Journal of Heat and Mass Transfer Research. – Semnan : Semnan University Press, 2019. – Vol. 6. – Iss. 2. – P. 155-167.
52. Atzeni S. The Physics of Inertial Fusion / S. Atzeni, J. Meyer-ter-Vehnc. – New York : Clarendon Press – Oxford, 2004. – 481 p.
53. Basu S. Power Plant Instrumentation and Control Handbook (2nd Edition) / S. Basu, A. K. Debnath – London : Academic Press, 2019. – 1152 p.
54. Bejan A. Heat transfer handbook / A. Bejan, A. D. Kraus – New Jersey : Wiley-Interscience, 2003. – 1496 p.
55. Belghazi M. Condensation heat transfer on enhanced surface tubes, experimental results and predictive theory / M. Belghazi, A. Bontemps, C. Marvillet // Journal of Heat Transfer. – New York : ASME, 2002 – Vol. 124(4) – P. 754–761.
56. Berge S. Handbook on design and operation of flexible pipes / S. Berge, A. Olufsen – Trondheim : SINTEF, 2017. – 686 p.
57. Brujan E. A. The final stage of the collapse of a cavitation bubble close to a rigid boundary / Brujan E. A., Keen G. S., Vogel A., Blake J. R. // Physics of Fluids. – New York : AIP, 2002. – Vol. 14. – Iss. 1. – P. 85-92.

58. Cengel Y. A., Heat and mass transfer : a practical approach / Y. A. Cengel – New York : McGraw-Hill, 2006. – 875 p.
59. Datenblatt ATP Messtechnik Waagen – PTSXR Intelligenter Druckmessumformer [Electronic resource] – Electronic data. – Mode of access: https://www.atp-messtechnik.de/media/pdf/65/15/25/PTS-XR_PTS-XR_D_Datenblatt.pdf – Title from the screen (viewed 21.08.2021).
60. Day C. F. The Development and Operation of An Inert Gas System for Oil Tankers / C. F. Day, Commander E. H. W. Platt, I. E. Tefler, R. P. Tetrean // The Institute of Marine Engineers. Transactions. – 1972. – Vol. 84. – Part 1. – P. 1-36.
61. DeWitt D. P. Principles of Heat and Mass Transfer / D. P. DeWitt, F. P. Incropera, A. S. Lavine, T. L. Bergman – Chichester : John Wiley and Sons Ltd, 2012. – 1072 p.
62. Digitale Einbauinstrumente M2 Thermoelemente ATP Messtechnik Waagen [Electronic resource] – Electronic data. – Mode of access: https://www.atp-messtechnik.de/media/pdf/50/69/78/M2-1TR5-4K-6_M2-1TR5-4K-6_D_Datenblatt.pdf – Title from the screen (viewed 21.08.2021).
63. Eckert E. R. G. Natural convection in an air enclosed between two vertical plates with different temperatures / E. R. G. Eckert, W. O. Carlson // International Journal of Heat and Mass Transfer. – Amsterdam : Elsevier, 1961. – Vol. 2. – Part 2. – P. 106-120.
64. Elder J. W. Turbulent free convection in a vertical slot / J. W. Elder // Journal of fluid mechanics. – Cambridge : Cambridge University Press, 1965. – Vol. 23. – Iss. 1. – P. 99-111.
65. Elert G. The Physics Hypertextbook [Electronic resource] / G. Elert – Electronic data. – Mode of access: <https://www.physics.info> – Title from the screen (viewed 21.08.2021).
66. Faber T. E. Fluid mechanics [Electronic resource] / T. E. Faber // Encyclopedia Britannica. – Electronic data. – Mode of access:

<https://www.britannica.com/science/fluid-mechanics> – Title from the screen (viewed 21.08.2021).

67. Haq Hafiz M. K. U. An investigation of thermal energy storage for industrial heat waste recovery: Storing heat waste into a ground TES system for a ship's diesel engine / Hafiz M. K. U. Haq, Birgitta J. Martinkauppi, Erkki Hiltunen // WSEAS Journal – Transactions on Heat and Mass Transfer, 2018 – Vol. 13. – P. 130-145.
68. HART Communication – Application Guide [Electronic resource] / HART Communication Foundation, 2013. – 194 p. – Electronic data. – Mode of access:
https://www.fieldcommgroup.org/sites/default/files/imce_files/technology/documents/HART_ApplicationGuide_r7.1.pdf – Title from the screen (viewed 21.08.2021).
69. Heyer H. Theory of Statistical Experiments / H. Heyer – New York : Springer-Verlag, 1982. – 289 p.
70. Holman J. P. Heat transfer : Tenth Edition / J. P. Holman – Boston : McGraw-Hill, 2010. – 758 p.
71. IMO – Mandatory audits and other amendments enter in force on 1 January 2016 [Electronic resource] – Electronic data. – Mode of access:
<https://www.imo.org/en/MediaCentre/PressBriefings/Pages/57-amendments-01012016.aspx> – Title from the screen (viewed 21.08.2021).
72. Jackson D. Influences of buoyancy on heat transfer to fluids flowing in vertical tubes under turbulent conditions / D. Jackson, W. D. Haller // Turbulent Forced Convection in Channels and Rod Bundles. – 1979. – Vol. 2. – P. 613-640.
73. Kolegaev M. O. Main ways of tanker inert gas system modernization / M. O. Kolegaev, I. D. Brazhnik // Суднові енергетичні установки: наук.-техн. зб. – 2018. – Вип. 38. – Одеса : НУ «ОМА». – С. 200-216.

74. Malakhov O. Improvement of working parameters of ships with the use of water-fuel emulsions / O. Malakhov, M. Kolegaev, D. Malakhova, I. Maslov, I. Brazhnik, R. Gudilko // Technology audit and production reserves. – 2018. – Vol. 6/3(44). – P. 14-20.
75. Malakhov Oleksiy V. New Forced Ventilation Technology for Inert Gas System on Tankers / Oleksiy V. Malakhov, Mikhail O. Kolegaev, Igor D. Brazhnik, Oksana S. Saveleva, Diana O. Malakhova // International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering (IJITEE). – 2020. – Vol. 9. – Iss. 4. – P. 2549-2555.
76. Micro-Epsilon optoNCDT ILR Laser-optical distance sensor [Electronic resource] – Electronic data. – Mode of access: <https://www.micro-epsilon.com/download/products/cat--optoNCDT-ILR--en.pdf> – Title from the screen (viewed 21.08.2021).
77. Minkowycz W. J. Handbook of Numerical Heat Transfer / W. J. Minkowycz, E. M. Sparrow, G. E. Schneider, R. H. Pletcher – New York : Wiley Interscience, 1988. - 1024 p.
78. Mitrovic J. Flow structures of a liquid film falling on horizontal tubes / J. Mitrovic // Chemical Engineering Technology. – Weinheim : Wiley-VCH GmbH, 2005. – Vol. 28(6). – P. 684–694.
79. Mitutoyo QuantuMike Series 293 – Coolant Proof Micrometer [Electronic resource] – Electronic data. – Mode of access: <https://mitutoyotoolsales.com/product/quantumike-series-293-coolant-proof-micrometer/> – Title from the screen (viewed 21.08.2021).
80. 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 / S. T. Mohyud Din, T. Zubair, M. Usman, M. Hamid, M. Rafiq, S. Mohsin // Indian Journal of Physics. – Calcutta : Springer, 2018. – Vol. 92. – Iss. 9. – P. 1109-1117.
81. Murphy J. Multi-dimensional modeling of multiphase flow physics: high-speed nozzle and jet flows - a case study / J. Murphy, D. Schmidt, S. P. Wang,

- M. L. Corradini // Nuclear Engineering and Design. – Amsterdam : Elsevier, 2001. – Vol. 204. – Iss. 1-3. – P. 177-190.
82. NOVA Dependable Gas Analysis Solution – 5300 Series Portable Flue Gas Analyzer [Electronic resource] – Electronic data. – Mode of access: <https://www.catalog.nova-gas.com/Asset/5300FG%20Portable%20Flue%20Gas%20Analyzer19.pdf> – Title from the screen (viewed 21.08.2021).
 83. Payri R. Flow regime effects on non-cavitating injection nozzles over spray behavior / R. Payri, F. J. Salvador, J. Gimeno, R. Novella // International Journal of Heat and Fluid Flow. – Amsterdam : Elsevier, 2011. – Vol. 32. – Iss. 1. – P. 273-284.
 84. Perry R. H. Perry's Chemical Engineers' Handbook – 7th edition / R. H. Perry, D. W. Green, J. O. Maloney – New York : McGraw Hill, 1997. – 2559 p.
 85. Reif Anna. Outer heat transfer coefficient for condensation of pure components on single horizontal low-finned tubes / Anna Reif, Alexander Büchner, Sebastian Rehfeldt, Harald Klein // Heat and Mass Transfer. – Berlin : Springer, 2019 – Vol. 55. – Iss. 1. – P. 3-16.
 86. Shervani-Tabar Mohammad Taghi. Numerical study on the effect of the cavitation phenomenon on the characteristics of fuel spray / M. T. Shervani-Tabar, S. Parsa, M. Ghorbani // Mathematical and Computer Modelling. – Amsterdam : Elsevier, 2012. – No56. – P. 105-117.
 87. Siew Fan Wong. Turbulence Characteristics Study of the Emulsified Flow / Siew Fan Wong, Sharul Sham Dol // WSEAS Journal – Transactions on Heat and Mass Transfer, 2019. – Vol. 14. – P. 45-50.
 88. Smart Wireless Thum Adaptor – Reference Manual – Rosemount Emerson Process Management [Electronic resource] – Electronic data. – Mode of access: <https://www.emerson.com/documents/automation/manual-smart-wireless-thum-adaptor-micro-motion-en-66142.pdf> – Title from the screen (viewed 21.08.2021).

89. SPC – Surface Treatment Experts : Base Materials [Electronic resource] – Electronic data. – Mode of access: <https://www.sharrettsplating.com/base-materials/> – Title from the screen (viewed 21.08.2021).
90. Spijker M. N. Numerical Stability [Electronic resource] / M. N. Spijker – Electronic data. – Mode of access: <http://www.math.leidenuniv.nl/~spijker/NumStab98.pdf> – Title from the screen (viewed 21.08.2021).

ДОДАТКИ
(АКТИ ВПРОВАДЖЕННЯ ДИСЕРТАЦІЙНОГО ДОСЛІДЖЕННЯ)

RIO DAWSON SCHIFFFAHRTSGESELLSCHAFT MBH & CO. KG

Act of results implementation

Dissertation for the scientific level of Doctor of Philosophy

by Igor Brazhnik

«Improvement of Processes in Inert Gas System on Tankers During the Oil Shipment»

We, the representatives of the mt «Cape Dawson» (Rio Dawson Schiffahrtsgesellschaft mbH & Co.KG) – Cargo Officer O. Peschanskyy and Chief Engineer J. C. Willet have confirmed that the scientific researches, performed by Igor Brazhnik have been implemented on board of mt «Cape Dawson».

The use of improved inert (flue) gas supply led to a reduction in the inertization period by 51.9% (the inertization period using standard inert gas supply was 30 hours 00 minutes, the inertization period using the developed advanced inert gas supply - 14 hours 25 minutes), which assured the acceleration of vessel's preparation for loading and transportation of cargo of unleaded gasoline, reduced ship downtime by 15 hours 35 minutes and saved fuel resources spent on inertizing cargo tanks with flue gases (the bunker of 1,87 metric tones of diesel oil was saved).

Cargo Officer of mt «Cape Dawson»

O. Peschanskyy

30/07/2018

Chief Engineer of mt «Cape Dawson»

J. C. Willet

30/07/2018



**FINAV ONE LIMITED**

171 OLD BAKERY STREET, VALLETTA VLT1455, MALTA

АКТ

про використання результатів дисертаційного дослідження

Бражніка Ігоря Дмитровича

«Поліпшення процесів в системі інертних газів на танкерах при перевезенні нафти»

(спеціальність 271 – річковий та морський транспорт)

Цей акт засвідчує, що запропоновані у дисертаційному дослідженні «Поліпшення процесів в системі інертних газів на танкерах при перевезенні нафти» технологія подачі інертного (димового) газу та методика оцінювання концентрації кисню в під час інертизації вантажних танків були використані на танкері «PS Houston».

Використання вдосконаленої подачі інертного (димового) газу призвело до скорочення терміну інертизації на 50,4 % (термін інертизації при використанні стандартної подачі інертного газу складав 28 годин 36 хвилин, термін інертизації з використанням розробленої вдосконаленої подачі інертного газу склав 14 годин 12 хвилин), що гарантувало прискорення підготовки танкера «PS Houston» до завантаження і транспортування нафтового вантажу «дизельне паливо з наднизьким вмістом сірки», скоротило час простою судна на 14 годин 34 хвилини та призвело до економії паливних ресурсів, які витрачались для інертизації вантажних танків димовими газами.

Карго офіцер «PS Houston»

Р. Атнабаєв

20-01-2021

Старший механік «PS Houston»

І. Григор'єв

20-01-2021



ЗАТВЕРДЖУЮ

Перший проректор Національного
університету “Одеська морська академія”

д.ю.н., професор

О.М. Шемякін
травня 2021 р.

АКТ

Про впровадження результатів дисертаційного дослідження Бражніка Ігора Дмитровича на тему “Поліпшення процесів в системі інертних газів на танкерах при перевезенні нафти” у навчальний процес Національного університету “Одеська морська академія”

Ми, що нижче підписались, начальник навчального відділу Національного університету “Одеська морська академія” Пархоменко М.М. та завідувач кафедри безпеки життєдіяльності Національного університету “Одеська морська академія” к.т.н., доцент Парменова Д.Г. склали цей акт у тому, що результати дисертаційної роботи Бражніка Ігора Дмитровича на тему “Поліпшення процесів в системі інертних газів на танкерах при перевезенні нафти” впроваджені у навчальний процес кафедри безпеки життєдіяльності, а саме:

– у лекційних та практичних заняттях з дисциплін: “Запобігання забрудненню морського середовища з суден” (для рівня вищої освіти бакалавр) і “Безпека життєдіяльності на річковому та морському транспорті” (для 3-го рівня вищої освіти доктора філософії), які викладаються у навчально-науковому інституті інженерії Національного університету “Одеська морська академія”.

Начальник навчального відділу
НУ “ОМА”

Пархоменко М.М.

Завідувач кафедри
безпеки життєдіяльності

к.т.н., доцент Парменова Д.Г.