

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

Кваліфікаційна наукова праця
на правах рукопису

Матейко Олексій Владиславович

УДК 629.5

ДИСЕРТАЦІЯ

**ОПТИМІЗАЦІЯ ПРОЦЕСУ ІНЕРТИЗАЦІЇ ВАНТАЖНИХ ТАНКІВ
СУДЕН-ГАЗОВОЗІВ**

Спеціальність 271 – Морський та внутрішній водний транспорт

Галузь знань 27 – Транспорт

Подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії

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

 Олексій МАТЕЙКО

Науковий керівник:
Сагін Сергій Вікторович,
доктор технічних наук, професор

АНОТАЦІЯ

Матейко О.В. Оптимізація процесу інертизації вантажних танків суден-газовозів.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 271 – Морський та внутрішній водний транспорт (галузь знань 27 – Транспорт). – Національний університет «Одеська морська академія» Міністерства освіти і науки України, Одеса, 2024.

Дисертаційне дослідження спрямоване на розв’язання науково-прикладного завдання – забезпечення процесу інертизації вантажних танків суден-газовозів із найменшими витратами енергії та мінімальною тривалістю.

Головною мотивацією проведених досліджень є наявність сьогоденних **запитів практики:**

- забезпечення процесу інертизації вантажних танків суден-газовозів;
- діагностування стану атмосфери вантажних танків під час проведення їх інертизації.
- зниження енергетичних витрат та підвищення екологічної безпеки під час проведення інертизації вантажних танків суден-газовозів.

Головне завдання наукового дослідження – управління суцільністю та рухом розділювального шару, який запобігає сумішутворенню між парами вантажу, що залишились у вантажному танку, та інертним газом, який подається до вантажного танка, під час забезпечення процесу інертизації.

Для розв’язання головного завдання дослідження виконані наступні **допоміжні завдання:**

- 1) визначення якісного та кількісного показників процесу інертизації вантажних танків суден-газовозів;

2) визначення енергетичної ефективності процесу інертизації вантажних танків суден-газовозів;

3) визначення екологічної ефективності процесу інертизації вантажних танків суден-газовозів.

Як результат розв'язання завдань дослідження сформульовано **наукове положення**: оптимізація процесу інертизації вантажних танків суден-газовозів (за енергетичною ефективністю та екологічною безпекою) досягається шляхом керованого впливу на розділювальний шар, який запобігає сумішутворенню між парами вантажу, що залишились у вантажному танку, та інертним газом, який подається до вантажного танка, чому сприяє переспрямування потоків інертного газу, який подається у верхню частину вантажного танка.

Наукове положення обґрунтоване **науковими результатами, вперше**:

- визначено, що управління суцільністю та рухом розділювального шару (який запобігає сумішутворенню між парами вантажу, що залишились у вантажному танку, та інертним газом, який подається до вантажного танка) досягається переспрямуванням потоку інертного газу з одночасним контролем його концентрації по всьому об'єму вантажного танку;

- запропоновано комплексний критерій оцінки якості перебігу процесу інертизації вантажних танків суден-газовозів, який враховує зміну концентрації інертного газу в атмосфері вантажного танка та тривалість інертизації;

- запропонована методика оцінки енергетичної ефективності процесу інертизації вантажних танків суден-газовозів, яка на відміну від існуючих враховує витрату інертного газу та час, що необхідний для процесу інертизації; і методика оцінки екологічної ефективності процесу інертизації вантажних танків суден-газовозів, яка на відміну від існуючих враховує кількість шкідливих речовин, що утворюються під час експлуатації енергетичного обладнання, яке використовується для забезпечення процесу інертизації.

Удосконалено:

- технологію визначення концентрації інертного газу в атмосфері вантажних танків суден-газовозів;
- технологію подачі інертного газу до вантажних танків суден-газовозів;
- технологію визначення показників, що характеризують енергетичну та екологічну ефективність суден морського та внутрішнього водного транспорту.

Отримала подальший розвиток:

- технологія визначення енергетичних та екологічних показників роботи допоміжного обладнання, що забезпечує процес інертизації вантажних приміщень суден-газовозів;
- технологія визначення стану атмосфери вантажних приміщень суден-газовозів до приймання вантажу.

Практичне значення отриманих результатів полягає в такому:

- діагностування суцільності розділювального шару, який запобігає сумішутворенню між парами вантажу, що залишились у вантажному танку, та інертним газом, який подається до вантажного танка, призводить до зменшення тривалості процесу інертизації, що скорочує стоянковий час суден-газовозів та фінансові витрати, що пов'язані з обслуговуванням у морських портах;
- переспрямування потоку інертного газу, який подається до вантажних танків суден-газовозів, дозволяє забезпечувати процес інертизації з максимально можливим тиском, не створюючи руйнівного впливу на розділювальний шар, який запобігає сумішутворенню між парами вантажу, що залишились у вантажному танку, та інертним газом, який подається до вантажного танка;
- технологія визначення стану атмосфери вантажного танка підвищує інформативний контроль процесу інертизації, що сприяє прийняттю рішень управління роботою обладнання, за допомогою якого забезпечується інертизація вантажних танків суден-газовозів.

Результати дисертаційного дослідження впроваджені:

- технологія визначення стану атмосфери вантажних танків – на суднах-газовозах вантажомісткістю 38646 м³, 88248 м³ та 145673 м³, що сприяло зменшенню тривалості процесу інертизації, призводило до зменшення навантаження на суднову електростанцію і скорочувало час експлуатації допоміжного обладнання, яке використовувалось під час інертизації;

- технологія визначення енергетичної та екологічної ефективності методів інертизації вантажних танків суден-газовозів – на суднах-газовозах вантажомісткістю 38646 м³, 42427 м³, 42563 м³, 72312 м³, 88248 м³, 88274 м³, 88302 м³, 145673 м³, 146817 м³, 162233 м³, що сприяло проведенню процесу інертизації за найбільш ефективним для кожного з суден-газовозів методом (каскадним, паралельним чи напівкаскадним);

- технологія діагностування суцільності розділювального шару, який запобігає сумішутворенню між парами вантажу, що залишились у вантажному танку, та інертним газом, який подається до вантажного танку – на суднах-газовозах вантажомісткістю 38646 м³, 42563 м³, 88248 м³, 88274 м³, 145673 м³, 162233 м³, що забезпечувало проведення процесу інертизації з найбільшою енергетичною та екологічною ефективністю;

- в освітньому процесі Національного університету «Одеська морська академія», а саме:

технологія переспрямування потоків інертного газу, який подається у верхню частину вантажного танка – під час викладання освітнього компонента «Процеси перетворення енергії суднових силових установок» (для здобувачів наукового ступеня магістр);

технологія визначення енергетичної ефективності процесу інертизації вантажних танків суден-газовозів – під час викладання освітнього компонента «Екологічна безпека та альтеративні джерела енергії» (для здобувачів наукового ступеня магістр);

технологія визначення енергетичної ефективності процесу інертизації вантажних танків суден-газовозів – під час викладання

освітнього компонента «Енергоресурсозбереження на судах морського та річкового транспорту» (для здобувачів наукового ступеня доктор філософії).

Ключові слова: бункерування, вантажний танк, вдосконалення генератор інертного газу, гідродинамічний потік, діагностика, екологічна безпека, енергетична ефективність, енергоспоживання, захист довкілля, зріджений природний газ, інертизація вантажних танків, інертизація, концентрація, математична модель, морський транспорт, морські перевезення, морські транспортні засоби, перевезення зрідженого природного газу, судно-газовоз, судновий двигун, сумішутворення, технічна експлуатація, технічний стан, транспортування зрідженого газу, управління, фізична модель, час інертизації.

Список опублікованих праць за темою дисертації

Статті в наукових фахових виданнях України (категорії Б), що входять до переліку наукових фахових видань України, у яких можуть публікуватися результати дисертаційних робіт на здобуття наукових ступенів доктора наук, кандидата наук та ступеня доктора філософії

1. Сагін С.В., Матейко О.В. Аналіз способів інертизації вантажних танків суден-газовозів // Суднові енергетичні установки : науково-технічний збірник. – 2023. – Вип. 47. – Одеса: НУОМА. – С. 148-156. doi: 10.31653/smf47.2023.148-156.

2. Сагін С.В., Матейко О.В. Особливості інертизації вантажних танків під час перевезення вогнебезпечних речовин // Водний транспорт. Збірник наукових праць. – 2024. – Вип. 2(40). – С. 36-49. doi.org/10.33298/2226-8553.2024.2.40.03.

3. Матейко О.В. Оптимізація процесу інертизації вантажних танків суден-газовозів // Суднові енергетичні установки : науково-технічний збірник. – 2024. – Вип. 48. – Одеса: НУОМА. – С. 75-88. doi: 10.31653/smf48.2024.75-88.

4. Matieiko O. Selection of optimal schemes for the inerting process of cargo tanks of gas carriers / O. Matieiko // Technology Audit and Production Reserves. – 2024. – №4(1(78)). – С. 43–50. <https://doi.org/10.15587/2706-5448.2024.310699>.

5. Matieiko O. Monitoring of the inertization of cargo tanks of LNG class vessels / O. Matieiko // Technology Audit and Production Reserves. – 2024. – № 5(1(79)). – С. 30–37. <https://doi.org/10.15587/2706-5448.2024.314048>.

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

6. Sagin S. Ensuring Operational Performance and Environmental Sustainability of Marine Diesel Engines through the Use of Biodiesel Fuel / S. Sagin, O. Kuropyatnyk, O. Matieiko, R. Razinkin, T. Stoliaryk, O. Volkov // Journal of Marine Science and Engineering. – 2024. – Vol. 12. – P. 1440. <https://doi.org/10.3390/jmse12081440>.

Статті у збірках матеріалів наукових конференцій

7. Сагін С. В., Матейко О. В. Оптимізація процесу дегазації вантажних танків нафтогазовозів // Матеріали 12-ї Міжнародної науково-практичної конференції «Сучасні енергетичні установки на транспорті і технології та обладнання для їх обслуговування», 06-08 вересня 2021 р. – Херсон: Херсонська державна морська академія. – 2021. – С. 152-153.

8. Сагін С.В., Матейко О.В. Аналіз схем інертизації вантажних танків спеціалізованих суден під час використання азоту // Збірник матеріалів IV міжнародної науково-практичної конференції: Дніпровські читання-2023, 7 грудня 2023 р. – Київ: Київський інститут водного транспорту імені гетьмана Петра Конашевича-Сагайдачного Державного університету інфраструктури та технологій. – 2023. – С. 86-90.

9. Матейко О.В. Оцінка якості перебігу процесу інертизації вантажних танків суден-газовозів / О.В. Матейко // Збірник матеріалів Міжнародної мультидисциплінарної наукової інтернет-конференції «Світ наукових

досліджень». 22-23 жовтня 2024 р. Вип. 34: м. Тернопіль, Україна, м. Ополе, Польща. – 2024. – С. 162-166. <https://www.economy-confer.com.ua/full-article/5792>.

10. Матейко О.В. Визначення критерію оцінки якості перебігу процесу інертизації вантажних танків суден-газовозів / О.В. Матейко // Збірник матеріалів Науково-технічної конференції молодих дослідників «Суднові енергетичні установки: експлуатація та ремонт», 21.11.2024. – Одеса: НУОМА. – 2024. – С. 54-59.

З наукових робіт, опублікованих у співавторстві, автору належать особисто:

[1], [2] – розробка технології та проведення експериментальних досліджень на суднах-газовозах, визначення енергетичних та екологічних показників процесу інертизації вантажних танків, обробка та аналіз отриманих експериментальних значень, розробка рекомендації щодо експлуатації систем інертизації вантажних танків суден-газовозів;

[6] – проведення експериментальних досліджень з визначення екологічних показників роботи суден морського транспорту;

[7], [8] – визначення оптимальних режимів допоміжного обладнання, що забезпечує процеси дегазації та інертизації вантажних танків суден-газовозів.

ANNOTATION

Matieiko O.V. Optimization of the cargo tanks inerting process on gas carrier vessels.

Dissertation for the scientific level of Doctor of Philosophy for specialties 271 – Maritime and inland water transport (Part of knowledge 27 – Transport). – National University "Odessa Maritime Academy" of the Ministry of Education and Science of Ukraine, Odesa, 2024.

The dissertation research is aiming at solving a scientific and applied problem – ensuring the inerting process of cargo tanks on gas carrier vessels with minimal energy costs and in the shortest possible time.

The main motivation for the conducted research is the current **demands of practice:**

- ensuring the cargo tanks inerting process on gas carrier vessels;
- diagnosing the atmospheric condition of cargo tanks during their inerting;
- reducing energy consumption and increasing environmental safety during the inerting of cargo tanks on gas carrier vessels.

The main task of the scientific research is to manage the integrity and movement of the separating layer, which prevents the formation of mixtures between residual cargo vapors in the cargo tank and the inert gas supplied to it during the inerting process. To solve the main research task, the following **auxiliary tasks** were accomplished:

- 1) determining the qualitative and quantitative indicators of the inerting process of cargo tanks on gas carrier vessels;
- 2) assessing the energy efficiency of the inerting process of cargo tanks on gas carrier vessels;
- 3) evaluating the environmental efficiency of the inerting process of cargo tanks on gas carrier vessels.

As a result of solving these **research tasks, a scientific position** has been formulated: optimization of the inerting process of cargo tanks on gas carrier vessels (in terms of energy efficiency and environmental safety) is achieved through controlled influence on the separating layer, which prevents mixture formation between residual cargo vapors in the cargo tank and the inert gas supplied to it, facilitated by redirecting the flow of inert gas introduced into the upper part of the cargo tank.

The scientific position is substantiated by scientific results, including **first done:**

- determination that managing the integrity and movement of the separating layer (which prevents mixture formation between residual cargo vapors in the cargo tank and the inert gas supplied to it) is achieved by redirecting the flow of inert gas while simultaneously controlling its concentration throughout the entire volume of the cargo tank;

- proposal of a comprehensive criterion for assessing the quality of the inerting process in cargo tanks on gas carrier vessels, which takes into account changes in inert gas concentration in the atmosphere of the cargo tank and the duration of inerting;

- proposal of a methodology for assessing the energy efficiency of the inerting process in cargo tanks on gas carrier vessels, which differs from existing ones by considering the consumption of inert gas and the time required for the inerting process; as well as a methodology for assessing the environmental efficiency of this process, which considers the amount of harmful substances generated during the operation of energy equipment used to ensure the inerting process.

Improved technologies include:

- technology for determining inert gas concentration in the atmosphere of cargo tanks on gas carrier vessels;

- technology for supplying inert gas to cargo tanks on gas carrier vessels;

- technology for determining indicators characterizing energy and environmental efficiency in marine and inland water transport vessels.

Further developed technologies include:

- technology for determining energy and environmental performance indicators of auxiliary equipment that ensures the inerting process in cargo spaces on gas carrier vessels;
- technology for assessing the atmospheric condition of cargo spaces on gas carrier vessels prior to loading.

The practical significance of the obtained results lies in:

- diagnosing the integrity of the dividing layer, which prevents the mixing of cargo vapors remaining in the cargo tank with the inert gas supplied to the cargo tank, leads to a reduction in the duration of the inerting process. This decreases the laytime of gas carriers and the financial costs associated with servicing in maritime ports;
- redirecting the flow of inert gas supplied to the cargo tanks of gas carriers, which allows the inerting process to be conducted at the maximum possible pressure without causing destructive effects on the dividing layer that prevents mixing between the cargo vapors remaining in the cargo tank and the inert gas supplied to it;
- technology for determining the state of the atmosphere in the cargo tank, which enhances informative control of the inerting process, facilitating decision-making regarding equipment operation that ensures the inerting of gas carrier cargo tanks.

The results of the dissertation research have been implemented in:

- technology for determining the state of the atmosphere in cargo tanks on gas carriers with capacities of 38,646 m³, 88,248 m³, and 145,673 m³, which contributed to reducing the duration of the inerting process, decreased the load on the ship's power plant, and shortened the operating time of auxiliary equipment used during inerting;
- the technology for determining the energy and environmental efficiency of inerting methods for gas carrier cargo tanks on ships with capacities of 38,646 m³, 42,427 m³, 42,563 m³, 72,312 m³, 88,248 m³, 88,274 m³, 88,302 m³, 145,673 m³,

146,817 m³, and 162,233 m³, which facilitated conducting the inerting process using the most effective method for each gas carrier (cascade, parallel, or semi-cascade);

- technology for diagnosing the integrity of the dividing layer that prevents mixing between cargo vapors remaining in the cargo tank and the inert gas supplied to it on gas carriers with capacities of 38,646 m³, 42,563 m³, 88,248 m³, 88,274 m³, 145,673 m³, and 162,233 m³, ensuring that the inerting process is conducted with maximum energy and environmental efficiency;

- in the educational process of the National University "Odessa Maritime Academy," namely:

technology for redirecting inert gas flows supplied to the upper part of the cargo tank – during the teaching of the educational component "Energy Conversion Processes of Ship's Power Plants" (for Master's degree students);

technology for determining energy efficiency in the inerting process of gas carrier cargo tanks – during the teaching of the educational component "Environmental Safety and Alternative Energy Sources" (for Master's degree students);

technology for determining energy efficiency in the inerting process of gas carrier cargo tanks – during the teaching of the educational component "Energy Resource Conservation on Sea and River Transport" (for PhD students).

Keywords: blending, bunkering, cargo tank, concentration, diagnostics, efficiency, energy consumption, energy efficiency, environmental protection, environmental safety, gas carrier, hydrodynamic flow, improvement, inert gas generator, inert gas, inerting of cargo tanks, inerting time, inerting, liquefied natural gas, management, marine engine, marine vehicles, maritime cargo transportation, maritime shipping, maritime transport, mathematic models, methods of inerting cargo tanks, physical model, ship engine, technical condition, technical operation, transportation of liquefied gas, transportation of liquefied natural gas.

List of published works on the topic of the dissertation

Articles in scientific professional publications of Ukraine included in the list scientific professional publications of Ukraine, which may publish the results of dissertations for the degree of Doctor of Sciences, Candidate of Sciences and

Doctor of Philosophy

1. Сагін С.В., Матейко О.В. Аналіз способів інертизації вантажних танків суден-газовозів // Суднові енергетичні установки : науково-технічний збірник. – 2023. – Вип. 47. – Одеса : НУ «ОМА». – С. 148-156. doi: 10.31653/smf47.2023.148-156.

2. Сагін С.В., Матейко О.В. Особливості інертизації вантажних танків під час перевезення вогнебезпечних речовин // Водний транспорт. Збірник наукових праць. – 2024. – Вип. 2(40). – С. 36-49. doi.org/10.33298/2226-8553.2024.2.40.03.

3. Матейко О.В. Оптимізація процесу інертизації вантажних танків суден-газовозів // Суднові енергетичні установки : науково-технічний збірник. – 2024. – Вип. 48. – Одеса : НУ «ОМА». – С. 75-88. doi: 10.31653/smf48.2024.75-88.

4. Matieiko O. Selection of optimal schemes for the inerting process of cargo tanks of gas carriers / O. Matieiko // Technology Audit and Production Reserves. – 2024. – №4(1(78)). – С. 43–50. <https://doi.org/10.15587/2706-5448.2024.310699>.

5. Matieiko O. Monitoring of the inertization of cargo tanks of LNG class vessels / O. Matieiko // Technology Audit and Production Reserves. – 2024. – № 5(1(79)). – С. 30–37. <https://doi.org/10.15587/2706-5448.2024.314048>.

Articles in foreign publications included in the international scientometric databases Scopus and Web of Science:

6. Sagin S. Ensuring Operational Performance and Environmental Sustainability of Marine Diesel Engines through the Use of Biodiesel Fuel / S. Sagin, O. Kuropyatnyk, O. Matieiko, R. Razinkin, T. Stoliaryk, O. Volkov //

Journal of Marine Science and Engineering. – 2024. – Vol. 12. – P. 1440.
<https://doi.org/10.3390/jmse12081440>.

Articles in collections of materials of scientific conferences

7. Сагін С. В., Матейко О. В. Оптимізація процесу дегазації вантажних танків нафтогазовозів // Матеріали 12-ї Міжнародної науково-практичної конференції «Сучасні енергетичні установки на транспорті і технології та обладнання для їх обслуговування» , 06-08 вересня 2021 р. – Херсон : Херсонська державна морська академія. – 2021. – С. 152-153.

8. Сагін С.В., Матейко О.В. Аналіз схем інертизації вантажних танків спеціалізованих суден під час використання азоту // Збірник матеріалів IV міжнародної науково-практичної конференції: Дніпровські читання-2023, 7 грудня 2023 р. – Київ : Київський інститут водного транспорту імені гетьмана Петра Конашевича-Сагайдачного Державного університету інфраструктури та технологій, 2023. – С. 86-90.

9. Матейко О.В. Оцінка якості перебігу процесу інертизації вантажних танків суден-газовозів / О.В. Матейко // Збірник матеріалів Міжнародної мультидисциплінарної наукової інтернет-конференції «Світ наукових досліджень». 22-23 жовтня 2024 р. Випуск 34: м. Тернопіль, Україна, м. Ополе, Польща. 2024. – С. 162-166. <https://www.economy-confer.com.ua/full-article/5792>.

Of the scientific works published in co-authorship, the author personally owns:

[1], [2], [6] – development of technology for conducting experimental research, determination of operational performance indicators of marine diesel engines, processing and analysis of obtained experimental data;

[3], [15] – conducting experimental research to determine the lubricating properties of fuel;

[4], [7] – determination of optimal operating modes of marine diesel engines when using low-sulfur fuel with different structural characteristics;

[9], [16] – conducting experimental research to determine the optimal fuel injection phases into the cylinder of marine diesel engines.

[10], [11], [12] – conducting research, developing recommendations for the use of marine fuels, including biofuels, and determining their impact on the environment;

[13] – conducting information search, determining the main operational characteristics of marine fuels and their requirements;

[17], [19], [20] – analysis of methods to increase the reliability of high-pressure fuel equipment during the use of low-sulfur fuels in marine diesel engines.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК ПРИЙНЯТИХ СКОРОЧЕНЬ	20
ВСТУП	21
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ ІЗ РОЗВ’ЯЗАННЯ ЗАВДАННЯ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ПРОЦЕСІВ ІНЕРТИЗАЦІЇ ВАНТАЖНИХ ТАНКІВ СУДЕН-ГАЗОВОЗІВ.....	30
1.1. Аналіз особливості конструкції та експлуатації суден, що призначені для перевезення зріджених газів	30
1.1.1. Технічні, екологічні та комерційні переваги транспортування зрідженого природного газу	30
1.1.2. Експлуатаційні характеристики суден-газовозів	34
1.1.3. Конструктивні особливості суден-газовозів	37
1.2. Аналіз основних небезпек, що виникають під час транспортування вантажів на суднах-газовозах	45
1.3. Аналіз основних технологічних операцій, що виконуються під час транспортування вантажів на суднах-газовозах	51
1.3.1. Загальні поняття та вимоги до системи інертних газів	51
1.3.2. Система розподілу інертного газу	53
1.3.3. Методи заміни газу в танках	56
1.4. Аналіз процесів, що відбуваються під час інертизації вантажних танків суден-газовозів	60
1.5. Висновки за розділом 1 та постановка завдання дослідження.....	71
РОЗДІЛ 2. ЗАГАЛЬНА МЕТОДИКА ДИСЕРТАЦІЙНОГО ДОСЛІДЖЕННЯ	72
2.1. Вибір теми наукового дослідження	72
2.2. Визначення шляхів досягнення завдань дослідження	75
2.3. Використання системного підходу під час розв’язання завдань наукового дослідження	77

2.4. Організація та забезпечення проведення експериментальних досліджень	87
2.5 Обладнання, пристрої та вимірювальні прилади під час проведення експериментальних досліджень	91
2.6. Висновки за розділом 2	93
РОЗДІЛ 3. АНАЛІЗ ФІЗИКО-ДИНАМІЧНИХ ПРОЦЕСІВ, ЩО ВІДБУВАЮТЬСЯ ПІД ЧАС ІНЕРТИЗАЦІЇ ВАНТАЖНИХ ТАНКІВ СУДЕН-ГАЗОВОЗІВ	
3.1 Класифікація та призначення систем інертних газів суден-газовозів.....	94
3.2. Аналіз методів зміни атмосфери вантажних танків суден-газовозів ..	98
3.3. Аналіз термодинамічних явищ, що відбуваються під час транспортування зріджених природних газів	104
3.4. Аналітичне визначення процесів конвективної дифузії в газах	111
3.5. Експериментальні дослідження з оцінки якості проведення процесу інертизації вантажних танків суден-газовозів	124
3.5.1. Визначення критерію оцінки якості перебігу процесу інертизації..	124
3.5.2. Визначення критеріїв проведення процесу інертизації вантажних танків судна-газовоза вантажомісткістю 38646 м ³	126
3.5.3 Визначення критеріїв проведення процесу інертизації вантажних танків судна-газовоза вантажомісткістю 42563 м ³	132
3.5.4. Визначення критеріїв проведення процесу інертизації вантажних танків судна-газовоза вантажомісткістю 88248 м ³	135
3.5.5. Визначення критеріїв проведення процесу інертизації вантажних танків суден-газовозів вантажомісткістю 145673 м ³ та 162233 м ³	138
3.5.6. Порівняння експериментальних та аналітичних результатів	141
3.6. Висновки за розділом 3	146
РОЗДІЛ 4. АНАЛІЗ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ ТА ЕКОЛОГІЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ МЕТОДІВ ІНЕРТИЗАЦІЇ ВАНТАЖНИХ ТАНКІВ СУДЕН-ГАЗОВОЗІВ	
	148

4.1. Аналіз енергетичної ефективності методів інертизації вантажних танків суден-газовозів	148
4.1.1. Результати досліджень на суднах-газовозах вантажомісткістю менше ніж 50000 м ³	150
4.1.2. Результати досліджень на суднах-газовозах вантажомісткістю 50000...100000 м ³	153
4.1.3. Результати досліджень на суднах-газовозах з вантажомісткістю більше за 100000 м ³	157
4.1.4. Аналіз результатів з визначення витрати азоту та тривалості процесу інертизації для суден-газовозів різної вантажомісткості	159
4.2. Аналіз екологічності методів інертизації вантажних танків суден-газовозів	163
4.3. Висновки за розділом 4	177
РОЗДІЛ 5. ОПТИМІЗАЦІЯ ПРОЦЕСУ ІНЕРТИЗАЦІЇ ВАНТАЖНИХ ТАНКІВ СУДЕН-ГАЗОВОЗІВ	178
5.1. Розробка технології переспрямування потоку інертного газу, що нагнітається до вантажних танків суден-газовозів під час забезпечення процесу їх інертизації	178
5.2. Дослідження процесу інертизації на суднах-газовозах з модернізованою системою інертних газів	181
5.2.1. Моніторинг атмосфери вантажних танків на судні-газовозі з вантажомісткістю 38646 м ³	181
5.2.2. Моніторинг атмосфери вантажних танків на судні-газовозі з вантажомісткістю 88248 м ³	183
5.2.3. Моніторинг атмосфери вантажних танків на судні-газовозі з вантажомісткістю 145673 м ³	186
5.2.4. Узагальнені результати моніторингу атмосфери вантажних танків на суднах-газовозах	189

5.3. Визначення енергетичної ефективності методів інертизації вантажних танків суден-газовозів з модернізованою системою інертних газів	191
5.4. Визначення екологічної ефективності методів інертизації вантажних танків суден-газовозів з модернізованою системою інертних газів	196
5.5. Висновки за розділом 5	203
ВИСНОВКИ	205
ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	211
ДОДАТОК	239

ПЕРЕЛІК ПРИЙНЯТИХ СКОРОЧЕНЬ

ЗПГ	– зріджений природний газ
МАРПОЛ	– Міжнародна конвенція по запобіганню забрудненню з суден
СІГ	– система інертних газів
СОЛАС	– Міжнародна конвенція з охорони людського життя на морі
СІІ	– Emission intensity indicator (Індикатор вуглецевої інтенсивності)
EEDI	– індекс енергоефективності конструкції
IMO	– International Marine Organization
LNG-ship	– Liquefied Natural Gas Ship
LPG-ship	– Liquefied Petroleum Gas Ship
MARPOL	– International Convention for the Prevention of Pollution from Ships
PSA	– Pressure Swing Adsorption
SECAs	– Sulphur Emission Control Areas
SOLAS	– International Convention for the Safety of Life at Sea

ВСТУП

Актуальність теми. Морський та внутрішній водний транспорт забезпечує перевезення вантажу між країнами та континентами, що поєднані річками або роз'єднані морями та океанами. При цьому судна морського транспорту є єдиним засобом транспорту, який забезпечує трансокеанське перевезення вантажів. Разом зі суднами, що призначені для перевезення генеральних, навалювальних, рефрижераторних вантажів, а також контейнерів та накатної техніки, існують судна класів Liquefied Petroleum Gas Ship (LPG-ship) та Liquefied Natural Gas Ship (LNG-ship), які забезпечують перевезення відповідних зріджених природного та нафтового газу.

В теперішній час кількість суден, що здійснюють перевезення зрідженого газу постійно зростає. Це пов'язано з енергетичною залежністю ряду країн (насамперед Європи, Канади, Китаю та Японії) та неможливістю постачання до них газового палива континентальними трубопроводами.

Обов'язковим етапом вантажних операцій в порту вивантаження зрідженого природного газу (ЗПГ) є інертизація вантажних приміщень. Після закінчення вивантаження в вантажних трюмах суден-газовозів завжди залишається декілька частина вантажу. Це пов'язано з неминучим підвищенням температури ЗПГ під час його вивантаження. Одночасно з цим частина залишків ЗПГ, що перевозився як вантаж, випаровується та (за властивостями газу) займає весь вільний обсяг вантажного танка.

Одним з основних завдань під час транспортування вуглеводневих вантажів (сирої нафти та нафтопродуктів, а також газів у зрідженому стані) є забезпечення пожежної безпеки. При чому до розв'язання цього завдання прикута увага класифікаційних товариств та міжнародних організацій, страхових, судновласницьких та суднобудівних фірм та компаній різних країн, крім того якість забезпечення процесу інертизації пов'язана з

вимогами міжнародних конвенції MARPOL та SOLAS. Саме на забезпечення пожежної безпеки спрямована інертизація вантажних танків, під час якої в них з тиском, підвищеним в порівнянні з тиском залишків парів вантажу, подається інертний газ.

Інертизація вантажних танків суден, що перевозять рідкі нафтові або зріджені газові вантажі, забезпечує зниження вмісту кисню в цих танках до рівню, що гарантують неможливість будь-якого займання безпосередньо вантажу, залишків пари вантажу, або суміші газів, що знаходиться в танку.

Джерелом інертних газів можуть бути випускні газі судових допоміжних котлів; газі, що генеруються в генераторі інертних газів під час спалювання в них рідкого палива; безпосередньо хімічно чисті азот. В перший двох випадках отримання інертного газу (функції якого утворює діоксид вуглецю CO_2) пов'язано зі спалюванням нафтового палива та додатковим негативним впливом на довкілля. В третьому – генератори азоту забезпечують виділення азоту N_2 з повітря, при цьому в атмосферу повертається чистий кисень O_2 . Генератори азоту можуть входити до складу судового обладнання суден-газовозів.

Процес інертизації пов'язані з екологічної безпекою суден та його впливом на довкілля. Проведення інертизації вантажних танків в акваторіях морських портів шкідливо впливає на атмосферу, а згодом (у зв'язку з осадженням небезпечних продуктів, що утворюються під час інертизації), також на морське та континентальне середовище. Це змушує до проведення інертизації у найкоротший час і з мінімальними викидами шкідливих речовин.

Викладене підтверджує **актуальність** теми дисертаційного дослідження та мети дослідження, а саме підвищення енергетичної ефективності та екологічної безпеки процесу інертизації вантажних танків суден-газовозів, – яка на початок його проведення мала лише поодинокі, непов'язані між собою рекомендації до розв'язання.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Робота виконувалася відповідно до положень Транспортної стратегії України на період до 2030 року (розп. КМУ 30.03.18 р. № 430-р); а також у рамках держбюджетної науково-дослідної роботи Національного університету «Одеська морська академія» «Прогнозування експлуатаційного технічного стану суднової пропульсивної установки на основі контролю її вібраційно-коливальних характеристик» № ДР 0119U001654 (2021–2024 рр.), у яких автор дисертації брав участь у виконанні окремих розділів.

Мета дослідження. Метою дослідження є підвищення енергетичної ефективності та екологічної безпеки процесу інертизації вантажних танків суден-газовозів

Основною науковою гіпотезою дослідження є теза, що підвищення енергетичної ефективності та екологічної безпеки процесу інертизації вантажних танків суден-газовозів досягається керованим впливом на концентрацію азоту (який використовується як інертний газ) в атмосфері вантажного танку та підтриманням суцільності розділювального шару, що попереджує сумішутворення між парами вантажу, які залишились у вантажному танку, та інертним газом, який подається до вантажного танку.

Головне завдання наукового дослідження полягає в управлінні суцільністю та рухом розділювального шару, який попереджує сумішоутворення між парами вантажу, що залишились у вантажному танку та інертним газом, що подається до вантажного танку під час забезпечення процесу інертизації.

Для розв'язання головного завдання дослідження виконані такі **допоміжні завдання**:

- 1) визначення якісного та кількісного показників процесу інертизації вантажних танків суден-газовозів;
- 2) визначення енергетичної ефективності процесу інертизації вантажних танків суден-газовозів;

3) визначення екологічної ефективності процесу інертизації вантажних танків суден-газовозів.

Об'єкт дослідження – процес транспортування зрідженого природного газу суднами-газовозами.

Предмет дослідження – процес інертизації вантажних танків суден-газовозів.

Під час проведення дослідження використовувались такі методи:

- дедукції, індукції та абстракції (під час виконання аналізу літературних джерел та інформаційного пошуку);
- системного аналізу (під час визначення мети дослідження; головного та допоміжних завдань та шляхів їх розв'язання; формулювання наукової новизни, наукової значимості та наукового положення, а також під час розробки технологічної карти наукового дослідження);
- математичного моделювання (під час аналізу процесів, що перебігають у вантажному танку судна-газовозі в разі їх інертизації);
- аналізу та синтезу (під час розробці технологічної схеми проведення експериментальних досліджень та обробці результатів);
- проведення експериментів, спостереження та апроксимації (під час визначення стану атмосфери вантажних танків суден-газовозів, а також енергетичних та екологічних показників роботи обладнання, що забезпечує процес інертизації);
- статистичної обробки даних (під час обробці експериментальних значень).

Наукова новизна роботи полягає в тому, що оптимізація процесу інертизації вантажних танків суден-газовозів (за енергетичною ефективністю та екологічною безпекою) досягається шляхом керованого впливу на розділювальний шар, якій попереджує сумішутворення між парами вантажу, що залишились у вантажному танку та інертним газом, що подається до

вантажного танку, чому сприяє переспрямування потоків інертного газу, який подається у верхню частину вантажного танку.

У результаті дослідження вперше:

- визначено, що управління суцільністю та рухом розділювального шару (який попереджує сумішутворення між парами вантажу, що залишились у вантажному танку, та інертним газом, що подається до вантажного танку) досягається переспрямуванням потоку інертного газу з одночасним контролем його концентрації по всьому об'єму вантажного танку;

- запропоновано комплексний критерій оцінки якості перебігу процесу інертизації вантажних танків суден-газовозів, якій враховує зміну концентрації інертного газу в атмосфері вантажного танку та тривалість інертизації;

- запропонована методика оцінки енергетичної ефективності процесу інертизації вантажних танків суден-газовозів, яка на відміну від існуючих враховує витрату інертного газу та час, що необхідний для процесу інертизації; та методика оцінки екологічної ефективності процесу інертизації вантажних танків суден-газовозів, яка на відміну від існуючих враховує кількість шкідливих речовин, що утворюються під час експлуатації енергетичного обладнання, яке використовується для забезпечення процесу інертизації.

Удосконалено:

- технологію визначення концентрації інертного газу в атмосфері вантажних танків суден-газовозів;

- технологію подачі інертного газу до вантажних танків суден-газовозів;

- технологію визначення показників, що характеризують енергетичну та екологічну ефективність суден морського та внутрішнього водного транспорту.

Отримала подальший розвиток:

- технологія визначення енергетичних та екологічних показників роботи допоміжного обладнання, що забезпечує процес інертизації вантажних приміщень суден-газовозів;

- технологія визначення стану атмосфери вантажних приміщень суден-газовозів до приймання вантажу.

Практичне значення отриманих результатів полягає в такому:

- діагностування суцільності розділювального шару який попереджує сумішутворення між парами вантажу, що залишились у вантажному танку, та інертним газом, що подається до вантажного танку призводить до зменшення тривалості процесу інертизації, що скорочує стоянковий час суден-газовозів та фінансові витрати, що пов'язані з обслуговуванням в морських портах;

- переспрямування потоку інертного газу, що подається до вантажних танків суден-газовозів, дозволяє забезпечувати процес інертизації з максимально можливим тиском не створюя руйнівного впливу на розділювальний шар, якій попереджує сумішутворення між парами вантажу, що залишились у вантажному танку та інертним газом, що подається до вантажного танку;

- технологія визначення стану атмосфери вантажного танку підвищує інформативний контроль процесу інертизації, що сприяє прийняттю рішень управління роботою обладнання за допомогою якого забезпечується інертизація вантажних танків суден-газовозів.

Результати дисертаційного дослідження впроваджені:

- технологія визначення стану атмосфери вантажних танків – на суднах-газовозах вантажомісткістю 38646 м³, 88248 м³ та 145673 м³, що сприяло зменшенню тривалості процесу інертизації та призводило зменшення навантаження на судову електростанцію та скорочувало час експлуатації допоміжного обладнання, яке використовувалось під час інертизації;

- технологія визначення енергетичної та екологічної ефективності методів інертизації вантажних танків суден-газовозів – на суднах-газовозах

вантажомісткістю 38646 м³, 42427 м³, 42563 м³, 72312 м³, 88248 м³, 88274 м³, 88302 м³, 145673 м³, 146817 м³, 162233 м³, що сприяло проведенню процесу інертизації за найбільш ефективним для кожного з суден-газовозів методом (каскадним, паралельним чи напівкаскадним);

- технологія діагностування суцільності розділювального шару, якій попереджує сумішутворення між парами вантажу, що залишились у вантажному танку та інертним газом, що подається до вантажного танку – на судах-газовозах вантажомісткістю 38646 м³, 42563 м³, 88248 м³, 88274 м³, 145673 м³, 162233 м³, що забезпечувало проведення процесу інертизації з найбільшою енергетичною та екологічною ефективністю;

- в освітньому процесі Національного університету «Одеська морська академія», а саме:

технологія переспрямування потоків інертного газу, який подається у верхню частину вантажного танку – під час викладання освітнього компонента «Процеси перетворення енергії суднових силових установок» (для здобувачів наукового ступеня магістр);

технологія визначення екологічної ефективності процесу інертизації вантажних танків суден газозовів – під час викладання освітнього компонента «Екологічна безпека та альтеративні джерела енергії» (для здобувачів наукового ступеня магістр);

технологія визначення енергетичної ефективності процесу інертизації вантажних танків суден газозовів – під час викладання освітнього компонента «Енергоресурсозбереження на судах морського та річкового транспорту» (для здобувачів наукового ступеня доктор філософії).

Особистий внесок здобувача полягає у:

- виконанні інформаційного пошуку та аналізу літературних джерел із розв’язання завдання забезпечення процесу інертизації вантажних танків суден-газовозів;

- проведення досліджень із визначення енергетичної та екологічної ефективності способів інертизації вантажних танків суден-газовозів;
- проведення досліджень та розробці рекомендацій щодо визначення стану атмосфери за різною висотою вантажного танку судна-газовозу;
- проведення досліджень щодо діагностування стану розділювального шару, якій попереджує сумішутворення між парами вантажу, що залишились у вантажному танку та інертним газом, що подається до вантажного танку;
- переобладнанні суднової системи інертизації та проведенні досліджень щодо переспрямування потоків інертного газу, який подається у верхню частину вантажного танку;
- розробки критеріїв з оцінки енергетичної та екологічної ефективності процесу інертизації вантажних танків суден-газовозів.

Роботи [80], [87], [157], [173], [194] виконані автором самостійно.

У роботах, які опубліковані в співавторстві, здобувачеві належать особисто:

[44], [45] – розробка технології та проведення експериментальних досліджень на суднах-газовозах, визначення енергетичних та екологічних показників процесу інертизації вантажних танків, обробка та аналіз отриманих експериментальних значень, розробка рекомендації щодо експлуатації систем інертизації вантажних танків суден-газовозів;

[60], [67] – визначення оптимальних режимів допоміжного обладнання, що забезпечує процеси дегазації та інертизації вантажних танків суден-газовозів;

[168] – проведення експериментальних досліджень з визначення екологічних показників роботи суден морського транспорту.

Апробація результатів роботи. Основні результати досліджень за темою дисертаційної роботи доповідались, обговорювались та були схвалені на низці міжнародних та Всеукраїнських наукових конференцій, зокрема:

12-й міжнародній науково-практичній конференції «Сучасні енергетичні установки на транспорті і технології та обладнання для їх

обслуговування», 06-08 вересня 2021 р., Херсон, Херсонська державна морська академія;

IV-й міжнародній науково-практичній конференції «Дніпровські читання-2023», 7 грудня 2023 р., Київ: Київський інститут водного транспорту імені гетьмана Петра Конашевича-Сагайдачного Державного університету інфраструктури та технологій;

міжнародній мультидисциплінарній науковій інтернет-конференції «Світ наукових досліджень», 22-23 жовтня 2024 р., м. Тернопіль, Україна, м. Ополе, Польща;

науково-технічній конференції молодих дослідників «Суднові енергетичні установки: експлуатація та ремонт», 21.11.2024 р., м. Одеса, Національний університет «Одеська морська академія».

Публікації. За темою дисертації опубліковано 10 наукових праць, з яких 5 – у наукових фахових виданнях України, що входять до переліку наукових фахових видань України (категорії Б), у яких можуть публікуватися результати дисертаційних робіт на здобуття наукових ступенів доктора наук, кандидата наук та ступеня доктора філософії; 1 – в іноземних виданнях другого квартилю Q2, які входять до міжнародних наукометричних баз даних Scopus та Web of Science; 4 – у збірках доповідей міжнародних наукових та науково-практичних конференцій, що проводились у провідних закладах вищої освіти України.

Структура та обсяг дисертації. Дисертація складається з переліку умовних скорочень, вступу, п'яти розділів, висновків, переліку використаних джерел та додатка (в якому надано акти впровадження результатів дослідження). Загальний обсяг дисертаційної роботи становить 244 сторінки, зокрема: основний текст 140 сторінок з анотацією на 14 сторінках, перелік використаних джерел із 194 найменувань на 28 сторінках, додаток на 5 сторінках, 67 рисунків, 43 таблиці.

РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ ІЗ РОЗВ'ЯЗАННЯ ЗАВДАННЯ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ПРОЦЕСУ ІНЕРТИЗАЦІЇ ВАНТАЖНИХ ТАНКІВ СУДЕН-ГАЗОВОЗІВ

1.1. Особливості конструкції та експлуатації суден, що призначені для перевезення скраплених газів

1.1.1. Технічні, екологічні та комерційні переваги зрідженого природного газу

Морський транспорт переважає над усіма типами транспорту, які забезпечують перевезення вантажу між країнами та континентами. При цьому судна морського транспорту є єдиним засобом транспорту, який забезпечує трансокеанське перевезення вантажів [1–3]. Крім того, морські судна перевозять практично всі види вантажів:

- насипні (у тому числі зернові та добрива) – за допомогою використання суден класу Bulk Carrier;
- генеральні (у тому числі техніку та обладнання) – на суднах класу General Cargo;
- накатні (у тому числі автомобілі) – на суднах типу Ro-Ro;
- великотоннажні – за допомогою суден класу Heavy Lift;
- контейнерні – за допомогою використання Container Ship;
- наливні – на суднах Oil Product / Crude Oil / Chemical Tanker [4–6].

Також існують судна класів Liquefied Petroleum Gas Ship (LPG-ship) та Liquefied Natural Gas Ship (LNG-ship), які забезпечують перевезення відповідних типів газу [7, 8].

На сьогоднішній день природний газ є найбільш екологічно чистим з усіх викопних палив. Природний газ не містить у своєму складі азоту, крім того вміст сірки в природному газі знаходиться на мінімальному рівні порівнянно з усіма нафтовими паливами. Це забезпечує відсутність під час згоряння природного газу паливних оксидів азоту та мінімальну кількість оксидів

сірки. Також під час згоряння природного газу потенційні викиди твердих частинок на кілька порядків нижчі, ніж під час згоряння рідких та твердих видів палива. Крім низьких викидів оксидів азоту, оксидів сірки, оксидів вуглецю, а також незгорілих вуглеводнів під час згоряння природного газу утворюється набагато менше парникових газів [9–12]. Це сприяє активному використанню природного газу як джерела енергії та поступовому витісненню природним газом інших видів палива (нафтопродуктів, вугілля, торфу).

На теперішній час природний газ займає домінуючу позицію серед інших видів палива в багатьох країнах світу. Природний газ використовується у двигунах автомобільного, залізничного та морського транспорту, а також у стаціонарній енергетиці та для забезпечення побутових потреб.

Сьогодні природний газ – це товар, що продається в усьому світі, який постачається або в газоподібному стані (трубопровідними магістралями), або в зрідженому стані (спеціальними морськими танкерами-газовозами). Як правило, основні замовники / споживачі газу знаходяться на великій відстані від його родовищ. У цих випадках метод транспортування ЗПГ морськими та океанськими шляхами є більш економічним порівняно з трубопровідним. Тому природний газ у зрідженому вигляді перевозиться морським транспортом. Морські термінали імпорту та експорту ЗПГ розташовані практично повсюдно. Це означає, що ЗПГ доступний практично в будь-якій точці світу [13, 14].

Перевезення природного газу суднами-газовозами здійснюється у спеціальних ізотермічних ємностях, при цьому газ охолоджується до температури $-160...-165\text{ }^{\circ}\text{C}$. Саме за цих умов відбувається перехід газу в рідкий стан з одночасним зменшенням його обсягу до 600 разів. Континентальними лідерами експорту зрідженого природного газу є країни, наведені у таблиці 1.1 [15, 16].

Таблиця 1.1

Країни-лідери з експорту зрідженого природного газу

Континент	Країна	Запаси газу (млрд. м ³) на 01.2023 р.	Географічний район
Австралія	Австралія	1600	Західна Австралія
Азія	Катар / Іран	35000	Перська затока
Африка	Алжир	3500	Північна Сахара
Європа	Нідерланди	2100	Північне море
Південна Америка	Венесуела	850	Північна Венесуела
Північна Америка	США	2300	Мексиканська затока

Судна-газовози, що призначені для перевезення ЗПГ, транспортують величезну кількість природного газу від терміналів зрідження до терміналів регазифікації, які розташовані в морських портах по всьому світу. У цих портах відбувається регазифікація газу та його подальша доставка споживачам. Найбільші регазифікаційні термінали Європи наведені у таблиці 1.2.

Таблиця 1.2

Найбільші регазифікаційні термінали Європи

Країна	Термінал	Потужність на 01.2023 р. (млрд. м ³)
Бельгія	Zeebrugge	9,0
Велика Британія	Teesside	4,0
Греція	Revithoussa	5,2
Іспанія	Barcelona	17,1
Італія	Porto Levante	8,0
Нідерланди	Gate Terminal	12,0
Польща	Swinoujscie LNG	5,0
Португалія	Sines	7,6
Туреччина	Marmara Ereğlisi	6,2
Франція	Montoir-De-Bretagne	10,0

У 2023 р. міжнародні постачання газу трубопроводами склали 682 млрд. м³, зрідженого газу суднами-газовозами – 412 млрд. м³. При цьому частка зрідженого газу в загальному обсязі поставок щорічно зростає та за прогнозами, що є, до 2030 р. збільшиться до 650...680 млрд. м³.

Необхідність у суднах-газовозах насамперед пов'язана з тим, що природні родовища газу (континентальні або шельфові) розташовані на великій відстані від великих споживачів газу. У зв'язку з цим доставка газу звичайними газотрубопроводами стає або нерентабельною, або взагалі неможливою. У таких умовах природний газ спочатку піддається скрапленню, після чого транспортується суднами-газовозами. При цьому розв'язується проблема транспортування великих обсягів газу на далекі (у деяких випадках трансатлантичні) відстані [17, 18]. Необхідність зрідження природного газу пояснюється через наступні обставини. Під час охолодження до температури, коли природний газ перетворюється на рідкий стан, його обсяг зменшується приблизно 600 разів. У рідкому стані природний газ закачується у вантажні танки суден-газовозів та перевозиться на спеціальні термінали [19, 20]. Це підвищує рентабельність його транспортування з великих віддалених родовищ на далекі відстані.

Зріджений природний газ є найкращою формою для перевезення та зберігання газу на суднах. Однак, усе обладнання для зберігання, передачі та використання газу має бути сконструйоване так, щоб постійно підтримувалися необхідні кріогенні умови. Крім того, всі технологічні операції з підготовки вантажних танків суден до транспортування ЗПГ, завантаження ЗПГ на судно-газовоз, транспортування ЗПГ з порту завантаження до порту розвантаження, розвантаження ЗПГ, зачищення вантажних танків після розвантаження ЗПГ повинні виконуватися відповідно до розроблених рекомендацій та забезпечувати конструкційну надійність [21, 22], вибухобезпеку [23, 24], екологічність [25, 26] та енергоефективність [27, 28]. Це є необхідною вимогою для безпечного та надійного функціонування суден, що забезпечують перевезення зрідженого газу.

1.1.2. Експлуатаційні характеристики суден-газовозів

Морські перевезення є важливою ланкою в ланцюгу транспортування ЗПГ від родовища до споживача. Судна для перевезення ЗПГ – одні з найдорожчих суден у світі, їхня вартість досягає 150...200 млн. дол. США за газовоз вантажомісткістю 120000...150000 м³. Вище стоять лише пасажирські лайнери, певний тип автомобільних поромів та військові кораблі. Як правило, кожен новий проєкт великотоннажного заводу супроводжується закладкою власних суден для постачання ЗПГ [29, 30].

Нині кількість верфей, що будують подібні судна, обмежена, оскільки термін будівництва суден зазвичай 32...36 місяців, їх потрібно планувати ще на стадії проєктування заводу. Іноді у випадках сприятливих цін на будівництво суден буває виправдано заздалегідь обрати верфі та замовляти судна ще до початку будівництва заводу ЗПГ.

Про зростання виробництва ЗПГ за останнє десятиліття можна судити за загальною кількістю суден подібного класу: у 2001 р. морськими перевезеннями ЗПГ займалися 128 суден-газовозів, у 2011 р. – 347, у 2021 р. – 396. Сьогодні світовий флот ЗПГ налічує 417 суден-газовозів (дані на 01.2023 р.) та близько 30 – на стадії будівництва [31, 32].

Параметри сучасних суден для перевезення ЗПГ, в середньому, 300 м завдовжки, 50 м завширшки, осадка 10...12 м, висота від ватерлінії до 40 м. Вони курсують із середньою швидкістю близько 19,5 вузлів та комплектуються екіпажами з 24...30 осіб.

Більше 30 років максимальна місткість танкерів LNG не перевищувала 140000 м³ зрідженого газу. Зі зростанням продуктивності великотоннажних заводів та попиту на ЗПГ виникла потреба у більш містких танкерах. У грудні 2008 р. було започатковано будівництво суден класу Q-Max з місткістю понад 250000 м³.

У даний час в залежно від вантажопідйомності танкери ЗПГ поділяються на класи:

- клас «Standart» з об'ємом вантажних танків 125000...170000 м³;
- клас «Q-Flex» з об'ємом вантажних танків 210000...217000 м³;
- клас «Q-Max» з об'ємом вантажних танків понад 250000 м³ [33, 34].

На початок 2023 р. у світі побудовано 32 суден-газовозів, що відповідають класу «Q-Max», та 23 судна-газовози класу «Q-Flex». Деякі технічні характеристики суден-газовозів нового покоління наведено у таблиці 1.3.

Таблиця 1.3

Характеристики суден-газовозів ЗПГ нового покоління

Характеристика	Q-Flex	Q-Max
Вантажомісткість, м ³	217000	266000
Довжина, м	302	332
Ширина, м	50	54
Висота надводної частини, м	27	27
Розрахункова осадка, м	12	12
Швидкість, вузли	17,5	18,0
Технологія зрідження випареного газу/продуктивність, кг/год	HGS, Mark III/6635	Cryostar EcoRel-S/6300
Головний двигун: тип, марка, кількість, потужність, кВт	Дизель MAN-B&W, 6S70ME-C, 2×18660	Дизель MAN-B&W, 7S70ME-C, 2×21770

Характер вантажу, що перевозиться (скраплений газ з температурою до -160 °C) визначає вимоги до процесу транспортування. Це означає, що на борту потрібно зберігати певну температуру рідини, при цьому пересуваючись морем з максимальною швидкістю з метою мінімізувати кількість випаруваного газу за рейс. У даний час технічний розвиток

метанових танкерів дозволив знизити рівень випаруваного газу до 0,15 % від обсягу вантажу, що перевозиться в день (приблизно 3 % за 20-денний перехід).

Питома вага СПГ складає 0,5 ваги води. Це означає, що навіть якщо танкер повністю завантажений зрідженим природним газом, більша частина його корпусу буде над водою, тим самим збільшуючи парусність корпусу судна, що спричиняє проблеми під час швартування судна у разі посилення вітру [35, 36].

Під час руху танкери ЗПГ зазвичай використовують випаруваний протягом рейсу газ як паливо своїх двигунів. У зв'язку з тим, що цього газу недостатньо для забезпечення роботи дизелів, а також з урахуванням того, що судна-газовози виконують також баластні переходи, на борту цих суден має бути запас також іншого палива [37, 38]. У 70-х роках минулого століття необхідність використання двох видів палива зумовила вибір парових турбін як головного суднового двигуна, оскільки паровий котел може використовувати кілька видів палива одночасно [39, 40]. З того часу аж до початку 2000-х років більшість суден-газовозів оснащувалась паротурбінними руховими установками.

Однак, починаючи з 1980 р., судна для перевезення ЗПГ залишились єдиними у світі великими суднами з паротурбінними енергетичними установками (поряд з атомними суднами). Це спричинило скорочення кількості постачальників парових турбін. Крім того, паротурбінні установки споживають більше пального, ніж дизельні. Технологічний прогрес дав можливість розробити гібридні двигуни: дизель-електричні та дизелі з можливістю споживати випаруваний газ [41, 42].

Застосування як головних двигунів дизельних та дизель-електричних установок, більш компактних та економічних, ніж парові турбіни, дозволило значно скоротити витрати палива. На багатьох суднах, у тому числі типів Q-Max та Q-Flex, проблема випаровування ЗПГ вирішена за рахунок розміщення на борту установки для зрідження газу та повернення його в

резервуари. Дане обладнання спричинило подорожчання LNG-танкера, але на лініях значної довжини їхнє використання вважається виправданим.

Під час баластного рейсу вантажні танки мають безперервно підтримуватись у холодному стані. Для цього після завершення розвантаження на дні вантажного танка залишається частина ЗПГ. Цей газ випаровується в дорозі і підтримує наднизьку температуру в танку.

Після прибуття в порт навантаження судно охолоджується протягом приблизно 90 хв., при цьому відбувається розпилення невеликої кількості зрідженого газу верхньої частини танків, що гарантує відсутність значних перепадів температури, які можуть спричинити руйнування танка. Після цього судно можна завантажувати із максимальною швидкістю [43, 44].

У разі прибуття судна до порту навантаження з теплими танками для охолодження до робочої температури -160°C може знадобитися 2...3 доби, оскільки існують суворі нормативи на допустимі епюри розподілу температур охолодження [45].

1.1.3. Конструктивні особливості суден-газовозів

Вантажні приміщення, чи танки суден-газовозів / метановозів, бувають двох типів: несучі та мембранні. Із загальної кількості метанових танкерів, за даними 2023 р., приблизно 40% – з несучими танками, 60% – з мембранними.

За вантажомісткості судна-газовозу до 130000 м^3 використання несучих танків ефективніше, ніж мембранних; у діапазоні $130000\text{...}165000\text{ м}^3$ їхні техніко-економічні характеристики приблизно рівні, а під час подальшого збільшення місткості використання мембранних танків стає кращим.

Несучі танки мають єдину оболонку, виготовлену з алюмінію або спеціальних сплавів і оточену шаром ізоляції. Конструкція танків виключає катастрофічні наслідки в разі пошкодження та буває таких систем:

- норвезької системи Moss Rosenbergco сферичними танками;
- системи ІНІ-SPB із призматичними танками, розробленої компанією ІНІ на базі концепції компанії Conch;
- система ADBT компанії Aker Solutions із призматичними танками [46].

Сферичні танки системи MOSS спочатку були взяті з суден, що перевозять скраплені нафтові гази, і дуже швидко завоювали популярність. Авторські права на конструкцію належать компанії Moss Maritime (Норвегія). Це незалежні танки, що самопідтримуються, та не є частиною корпусу судна. Встановлені на внутрішнє дно за допомогою спеціальних стільців та юбок. Належать до типу В – побудовані відповідно до спеціальних аналітичних розрахунків для витримування напруги, деформації та втоми металу.

Сферичні танки виготовляються з листів алюмінієвих сплавів або легованої нікелем сталі завтовшки 40...80 мм. Їхній діаметр досягає 40 м, тому вони майже наполовину виступають над рівнем верхньої палуби. У середині танків відсутні будь-які конструктивні елементи чи ребра жорсткості. Зовнішня ізоляція виготовляється з пінополіуретану, на зовнішню поверхню якого наносять алюмінієву фольгу. Товщина ізоляції на великих газовозах сягає 250 мм. Надпалубну частину танків закривають залізними кожухами.

Перевагами сферичних танків є відносна дешевизна та тривалий позитивний досвід експлуатації. Ці танки не схильні до «слошингу» – ефекту коливання рідини за наявності великої вільної поверхні, отже, ступінь їх завантаження не має значення під час плавання. Термін будівництва танкерів сферичної конструкції значно нижчий, ніж мембранних, тому що сферичні танки будуються окремо від судна, а потім вкладаються в готовий корпус.

До недоліків даної конструкції можна віднести велику вагу та фіксований граничний об'єм, високу парусність судна (особливо в баласті), високу плату за прохід Панамським та Суецьким каналами (ширина судна зі сферичними танками на 10 % більше, ніж судна з мембранними танками) та тривалий час охолодження перед завантаженням ЗПГ [47, 48].

Призматичні танки системи IHI-SPB (Self-supporting, Prismatic-shape IMO type B) відносяться до типу В. Однією з особливостей конструкції є вільна форма танка. Вона дозволяє конструювати танки відповідно до внутрішніх обрисів корпусу судна, домагаючись ідеального припасування.

Внутрішня оболонка танків виконується з алюмінієвого сплаву або 9 % нікелевої сталі. Із зовнішнього боку танки покриті ізоляцією з пінополіуретанових панелей, прикріплених центром шпильками до оболонки. Простір між панелями заповнено так званими подушками, що поглинають відносне зміщення оболонки танка та температурну напругу в шарі ізоляції. На відміну від мембранних систем, ізоляція не приймає навантаження з боку ЗПГ. Танк спирається на колодки із посиленої фанери, встановлені на днищі судна. Внутрішня частина танка розділена на чотири відсіки вертикальною герметичною осьювою перегородкою і поперечною вертикальною перфорованою перегородкою. Спільно з горизонтальними ребрами перегородки знижують ударні навантаження від сплесків рідини під час виникнення бортової хитавиці. Це дає можливість завантажувати ЗПГ у танк до будь-якого рівня та використовувати дану систему під час проєктування плавучих заводів ЗПГ [49, 50].

До переваг даної системи танків відносяться менша парусність, ніж у танкерів сферичної конструкції, менша необхідна ходова потужність з урахуванням компактності та ідеальної форми корпусу судна, короткий термін обслуговування в сухому доці (до двох тижнів кожні п'ять років) та хороша опірність зовнішньому тиску [51].

Призматичні танки системи ADBT – Aluminium Double-bamer Tanks – розробки 2009 р. Wadan Yard CNG Technology GmbH & Aker Solutions, що є незалежними самопідтримувальним танками типу А із зовнішньою теплоізоляцією і опорою на дно судна. Танки розроблені як для суден ЗПГ, також і для плавучих заводів ЗПГ з об'ємом від 1000 м³ до 150000 м³.

Конструкція танка включає оболонку з подвійних алюмінієвих пластин, між якими перпендикулярно встановлені ребра жорсткості, що приймають

ударні навантаження. Внутрішні стінки, що розбивають весь простір танка на кілька напіввідкритих камер, працюють за принципом хвилерізу і значно знижують ударні хвильові навантаження від сплесків рідини [52].

Мембранні вантажні танки – це ємності, утворені тонкою оболонкою (0,5...1,2 мм), яка здатна сприймати тільки напруги, що розтягують, і спирається на суміжні корпусні конструкції. Конструкції мембранних танків забезпечують непроникність своєї оболонки як при деформаціях, пов'язаних із вигином корпусних конструкцій, так і за термічних деформацій. Мембранні танки не самопідтримуються. Термальні навантаження компенсуються якістю металу мембрани (нікель, алюмінієві сплави). Міжнародний газовий кодекс наказує, що система повинна мати двошарову мембрану, складену з двох ідентичних або різних ізолюючих мембран.

У даний час для суден мембранної конструкції на ринку присутні три французькі мембранні технології:

- система GazTransport NO-96;
- система Technigaz Mark III;
- система CS1.

Система GazTransport NO-96 включає дві однакові мембрани і два незалежних шари ізоляції. Мембрана виконана з інвару (феросплав із 36 % нікелю) товщиною 0,7 мм. Первинна мембрана перебуває у контакті зі зрідженим природним газом, а наявність вторинної мембрани є 100 % гарантією від витоків ЗПГ. Динамічні та термальні навантаження на мембрану передаються через шар ізоляції на сталеву конструкцію судна.

Первинний та вторинний шари ізоляції виконані з фанерних боксів, заповнених розширеним перлітом. Стандартний розмір боксу 1×1,2 м. Товщина первинної ізоляції 170...250 мм, стандартна товщина вторинної ізоляції – 300 мм. Вторинну ізоляцію кріплять до внутрішньої оболонки корпусу судна. Бокси з перлітом мають внутрішнє зміцнення для протидії високому тиску і поглинання енергії рідини, що рухається. Мембрани

кріпляться до ізоляції спеціальними пристроями, що дозволяють шару інвару вільно ковзати шаром ізоляції.

Система зарекомендувала себе позитивно за більш ніж сорокарічний період експлуатації – першими танками цієї системи оснастили у 1969 р. танкери, призначені для заводу ЗПГ на Аляску [53].

Система Technigaz Mark III включає первинну гофровану мембрану з нержавіючої сталі завтовшки 1,2 мм. Стандартний розмір гофрованих листів 3×1 м. Перпендикулярне гофроване рифлення дозволяє мембранам пристосовуватися до будь-яких теплових або корпусних відхилень напруги та працювати поза межами втрати, забезпечуючи тим самим високий термін експлуатації. Вторинна тришарова мембрана виготовлена з листового композиційного матеріалу – триплексу (тонкий лист алюмінію між шарами склотканини та смоли). Ізоляція являє собою несучу систему зі збірних панелей, що включають армований пінополіуретан зі вставками зі скловолокна. Первинна та вторинна ізоляції ідентичні. Стандартний розмір панелей 3×1 м. Товщина ізоляції регулюється в діапазоні 250...350 мм. Панелі кріпляться до внутрішньої частини корпусу. Ця система має 30-річний досвід експлуатації. Вставки зі скловолокна в шарі пінополіуретану надають панелям високих властивостей міцності.

Система CS1 включає первинну мембрану з інвару, вторинну мембрану з триплексу та ізоляцію (первинну та вторинну) з армованого пінополіуретану, що є комбінацією перших двох систем. З метою безпеки внутрішній простір ізоляції всіх систем заповнюють азотом та спеціальними приладами контролюють наявність вуглеводнів в азоті у разі витoku.

Усі мембранні системи розроблені та постачаються французькою компанією GazTransport & Technigaz [54].

Танки мембранної конструкції мають три основні недоліки:

1) їхня конструкція є менш надійною (товщина інварової мембрани становить 0,4 мм, тоді як найтонша частина сферичного танка має товщину 3 см);

2) їхній ремонт ускладнений, тому що відсутній вільний простір між ізоляцією та металевою стінкою судна;

3) вони не витримують високих ударних навантажень (наприклад, від ефекту «слошингу» або у разі плавання у льодах).

Мембранні танки GTT (GazTransport & Technigaz) будуються тільки після спуску судна на воду, вони дорожчі за сферичні, і загальний час будівництва танкера – близько 1,5 років. Однак мембранні танкери мають безліч переваг:

- вони на 10 % легші, ніж танкери сферичної конструкції з рівною об'ємною вантажомісткістю, отже, теоретично дешевші при будівництві та експлуатації;

- їхні палуби плоскі, що полегшує обслуговування танків;

- вони не завишаються над водою, як сферичні танки, що полегшує маневреність судна і забезпечує кращий огляд з капітанського містка;

- вони охолоджуються досить швидко завдяки низькотемпературній ізоляції та гнучкості мембран, витримують набагато більше температурних циклів. Це зменшує час охолодження після сухого доку та забезпечує більшу експлуатаційну гнучкість у підтримці температури танків протягом зворотного рейсу;

- завдяки невеликому обсягу, вони мають малий тоннаж, отже, нижче портовий збір та мито за прохід Панамським та Суецьким каналами

Одним із головних недоліків танкерів мембранної конструкції є вразливість перед ударними навантаженнями з боку рідини, що коливається, за умови великої вільної поверхні (ефект «слошинга»). Для запобігання виникненню ударних навантажень під час руху судна танки мембранної конструкції повинні бути завантажені на висоту або не менше 75 %, або не більше 15 %.

Заходи боротьби з ефектом «слошингу» розробляються компаніями по всьому світу. Наприклад, компанія Samsung на Міжнародній конференції Gastech 2011 представила свою розробку для боротьби з цим явищем.

Система плаваючого антислошингового шару «AntiBogAntiSloshBlanket – ABAS Blanket» являє собою шар плаваючих кубиків на поверхні рідини, гнучко з'єднаних між собою. Кожен кубик має таку структуру: ядро кубика – порожниста тонкостінна алюмінієва куля, яка оточена піною меламіну (термостійкого в умовах низьких температур і дуже легкого полімеру) і покрита шаром кріогенностійкої тканини з поліакрилатового волокна. Сумарна густина кубика має бути меншою за густину зрідженого газу, тобто менше 424 кг/м^3 . Кубики укладаються в 2...3 шари і скріплюються карабінами з легкого сплаву або алюмінію. Такий шар на поверхні ЗПГ повинен не тільки гасити коливання вільної поверхні рідини під час зовнішній збурень, а й запобігати випаровуванню легких компонентів під час тривалих морських перевезень [55, 56].

У зв'язку з виходом газодобувної промисловості на арктичний шельф морська індустрія відкриває епоху суден нового льодового класу – створює проекти ЗПГ-танкерів, здатних прокладати собі шлях через крижини. Фінська компанія Aker Arctic Technology Inc. розробила концепцію судна подвійного дії – під час роботи у льодах танкер рухається кормою вперед. Це економить паливо та енергію суднових двигунів, а також береже носову частину судна для руху відкритою водою.

За даними Lloyd's Register publication Horizons, з 2011 р. замовлення на ЗПГ-судна льодового класу розміщуються на верфях Кореї та Японії.

Фінські кораблебудівники також пропонують новий тип криголама для надання допомоги великим та широким ЗПГ-танкерам. Рухаючись боком, криголам може використовувати всю свою довжину для прокладання широкого каналу в льодах.

Завантаження та розвантаження суден-газовозів здійснюється або біля берегових причалів, або біля терміналів, що розташовані в морі.

Завантажувальний вузол заводу ЗПГ, як і розвантажувальний вузол регазифікаційного терміналу, розташовується на причалі, що винесений у море, і з'єднується з резервуарами для зберігання кріогенними

трубопроводами. Відстань причалу від берега залежить від глибини моря в місці розвантаження: танкери ЗПГ повинні вільно маневрувати поблизу причалу.

На заводах ЗПГ для відкачування ЗПГ з резервуара застосовуються насоси відцентрового типу з електродвигуном, що забезпечують тиск нагнітання в 0,7...1,0 МПа. Продуктивність резервуарних насосів має бути близько 1350...2000 м³/год. Під час завантаження танкерів відкачування ЗПГ проводиться одночасно кількома насосами з усіх резервуарів.

Розантаження ЗПГ із вантажних танків здійснюється судновими насосами. Судно оснащується занурювальними насосами, по два насоси за кожен танк. На борт судна береговими компресорами закачується газ.

Під час завантаження та розвантаження танкери ЗПГ з'єднуються з причалом за допомогою гнучких завантажувальних рукавів. Як правило, термінали оснащуються 3...4 завантажувальними рукавами. При цьому 2..3 рукави працюють для завантаження ЗПГ, 1 рукав – для зворотного закачування газу з метою запобігання утворенню вакууму в резервуарі або в судовому танку [57, 58].

Звичайна швидкість завантаження-вивантаження ЗПГ становить від 10000...12000 м³/год. За такої швидкості танкер класу «Standart» завантажувється та розвантажувється протягом 12 год.

За останні роки в індустрії ЗПГ з'явилися нові плавучі регазифікаційні установки – Floating Storage and Regasification Unit (FSRU). Це пов'язано з високою вартістю берегових територій та посиленими екологічними вимогами в прибережній зоні. Розміщення приймальних терміналів на морі дозволяє віддалити об'єкти ЗПГ від населених пунктів і скоротити терміни будівництва терміналів. Плавучий приймальний термінал завантажує ЗПГ з танкерів у свої резервуари, а бортова регазифікаційна установка випарює зріджений газ і подає його в підводний газопровід через систему гнучких колекторів.

1.2. Аналіз основних небезпек, що виникають під час транспортування вантажів на судах-газовозах

Одним з основних завдань під час транспортування вуглеводневих вантажів (як сирової нафти та нафтопродуктів, також і газів у зрідженому стані) є забезпечення пожежо- та вибухобезпеки [59, 60]. Причому забезпеченню розв'язання цього завдання приділяється увага класифікаційних товариств та міжнародних організацій, страхових, судновласницьких та суднобудівних фірм та компаній різних країн [61, 62].

Займання, що носить у закритому вантажному приміщенні вибуховий характер, може бути спричинене наявністю трьох елементів, що становлять так званий трикутник горіння: джерела займання, горюча речовина та достатня кількість кисню. Джерелами займання можуть бути:

- 1) іскра, що виникає при контакті металевих предметів;
- 2) самозаймання парів горючих речовин у результаті підвищення їхньої температури;
- 3) гарячі поверхні парових змішувачів обігріву вантажу (для нафтових танкерів);
- 4) накопичення заряду статичної електрики, пов'язаного, зокрема, з тертям середовища об стінки трубопроводу, що рухається, а також з тертям корпусу судна об поверхню води [63, 64].

Якщо перші три чинники піддаються певному контролю, появи розрядів статичної електрики, особливо для вантажних танків великого обсягу, уникнути практично неможливо.

На всіх стадіях експлуатації нафтових танкерів, так і суден-газовозів неможливо уникнути присутності у вантажних танках і другого компонента, необхідного для займання, – парів горючих речовин [65, 66].

Залежно від роду вантажу, його температури та операцій у незаповненому просторі вантажного танка знаходиться та чи інша кількість

легкозаймистих парів вантажу. Ці пари є сумішшю летючих фракцій – окремих вуглеводнів з класу нормальних парафінів (метану, етану, пропану та інших). Кожен з цих газоподібних вуглеводнів має межі займання, що відповідають певній концентрації в повітрі, і кожен з них є вибухонебезпечним. Найбільш поширеним способом запобігання самозайманню парів вуглеводнів є інертизація та дегазація вантажних танків [67, 68].

Інертизація та дегазація вантажних танків суден-газовозів може бути забезпечена в різні способи, причому окремі вантажі вимагають власних варіантів цих технологічних операцій. Процеси інертизації та дегазації пов'язані з екологічною безпекою суден та їх впливом на довкілля [69–71]. Проведення інертизації та дегазації вантажних танків в акваторіях морських портів шкідливо впливає на атмосферу, а згодом (у зв'язку з осадженням небезпечних продуктів, що утворюються при інертизації та дегазації) – також на морське та континентальне середовище. Це спонукає до проведення інертизації та дегазації у найкоротший час та з мінімальними викидами шкідливих речовин [72, 73].

Послідовність технологічного ланцюжка отримання вантажу (нафти, нафтопродуктів або зрідженого газу) у порту навантаження – транспортування вантажу морськими або океанськими шляхами – розвантаження вантажу в порту доставки завершується обов'язковим зачищенням вантажних танків. Як правило, вона виконується за схемою «інертизація – дегазація – повторна інертизація». У зв'язку з тим, що після розвантаження нафтові танкери та судна-газовози здійснюють зворотні переходи в баласті, якість проведення операцій із зачистки танків після розвантаження набуває дуже важливого значення. Це пов'язано з тим, що саме від її виконання залежить вибухобезпечність вантажних танків і, отже, безпека судна [74, 75], суднового екіпажу [76, 77] та довкілля [78, 79].

Під час прийому вантажу (сирої нафти, нафтопродуктів, зрідженого природного чи нафтового газу) над поверхнею рідини утворюється

концентрований шар газоподібних вуглеводнів. Цей шар піднімається разом із рідиною без помітної зміни концентрації. Газова суміш, що виходить з танка, на початку прийому вантажу в основному складається з повітря і незначної кількості вуглеводнів. У міру збільшення кількості вантажу концентрація вуглеводнів починає зростати. Зростання концентрації вуглеводнів триває доти, доки концентрований шар газоподібних вуглеводнів не досягне вихідного отвору. При цьому необхідно, щоб концентрація кисню в шарі над поверхнею вантажу була такою, за якої неможливе загоряння парів вантажу [80, 81]. Теоретична діаграма, яка показує зони займистості та безпеки суміші парів вуглеводнів та кисню, наведена на рис. 1.1.

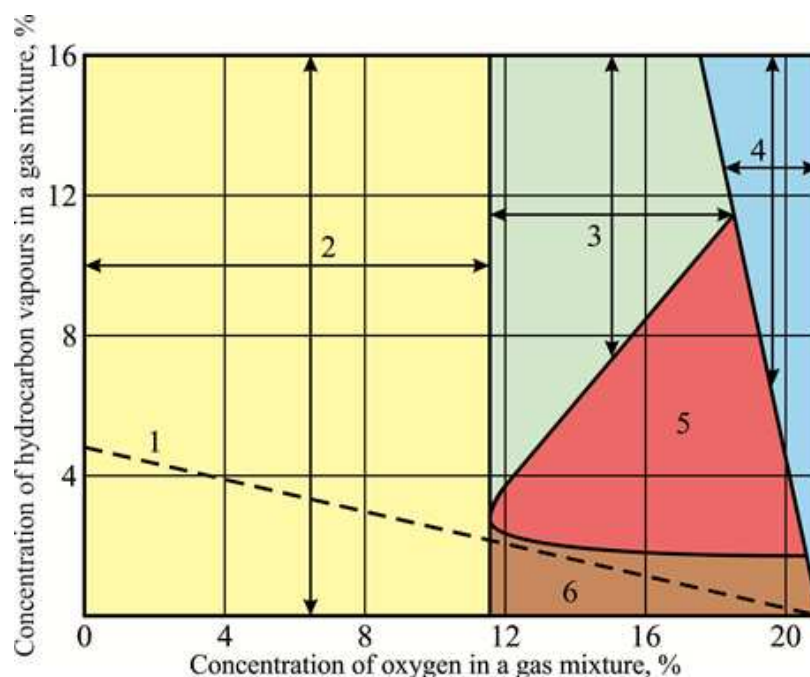


Рис. 1.1. Діаграма зон займистості та безпеки суміші парів вуглеводнів та кисню:

1 – критична лінія процесів змішування з повітрям; 2 – зона низького вмісту кисню (можливість займання відсутня); 3 – зона перебагаченої суміші (можливість займання відсутня); 4 – лінія граничного вмісту кисню в суміші повітря та пари вуглеводнів (справа лінії суміш теоретично нездійсненна); 5 – зона займистості; 6 – зона збідненої суміші (можливість займання відсутня)

Кожна точка діаграми відповідає газовій суміші, до якої входять пари вуглеводнів, кисню та інертного газу. При цьому концентрація вуглеводнів C_{CH} та кисню C_{O_2} визначається за відповідними осями діаграми, а концентрація інертного газу C_{IG} , як:

$$C_{IG} = 100 - C_{CH} - C_{O_2}.$$

Графічні залежності, що надані на рис. 1.1, відображають, як зі зменшенням концентрації кисню звужуються межі займистості газової суміші, що містить кисень, вуглеводні та інертний газ. За концентрації кисню менше 11,5 % спалах неможливий так само, як у випадку Perezбагаченої або збідненої газової суміші вуглеводнями.

Діаграма складається з п'яти зон (2, 3, 4, 5, 6), а також критичної лінії процесів змішування з повітрям 1 і лінії граничного вмісту кисню в суміші повітря та парів вуглеводневого вантажу 4.

У зоні 2 вміст кисню у суміші настільки мале, що можливість займання суміші відсутня. Також неможливе займання суміші в зоні 3 з високим вмістом кисню. Також вибухобезпечними є зони 4 та 6. Зона 4 відповідає суміші, утворення якої теоретично неможливе. Зона 6 – збідненої суміші, концентрації парів вуглеводнів, якої недостатньо для їх займання.

Єдиною вибухонебезпечною зоною з усіх, що зображені на рис. 1.1, є зона 5. Саме в ній концентрація парів вуглеводнів і кисню забезпечує займання суміші. Саме ця зона є небезпечною під час проведення всіх вантажних операцій на суднах, які перевозять вуглеводневі вантажі (сиру нафту, нафтопродукти, а також скраплені природний та нафтовий газ).

На діаграмі зон займистості та безпеки також можуть бути відображені процеси, що відбуваються під час вантажних операцій на суднах нафто- та газозавозах (рис. 1.2).

У міру того, як інертний газ додається до суміші парів вуглеводнів з повітрям, діапазон займання зменшується доти, доки не буде досягнута точка Е, в якій нижня і верхня межі займистості збігаються.

Ця точка відповідає вмісту кисню, що дорівнює 11,5 %. У практичних цілях і з урахуванням прийняття коефіцієнта безпеки приймається 8 %-ий рівень вмісту кисню в газовій суміші, яка знаходиться у вантажному танку. При цьому жодна із сумішей, до складу якої входять пари будь-яких вуглеводнів і повітря, не може спалахнути за жодних обставин.

Розширення безпечної зони (займання та вибух у якій неможливі) забезпечується шляхом подачі у вантажні танки інертного газу з вмістом кисню трохи більше 5 %. Крім того, за допомогою інертного газу виконують витіснення суміші, що знаходиться в танку. Ця операція триває до того часу, доки остаточний вміст кисню у всьому об'ємі танка стане менше 8 % за обсягом.

Коли якась інертна суміш, така як та, яка представлена точкою F, розбавляється повітрям, її склад змінюється по лінії FA і, таким чином, входить у виділену зону займистих сумішей. Це означає, що всі інертні суміші на ділянці вище за лінію GA (критична лінія розведення) проходять через стан займання в міру того, як вони змішуються з повітрям, наприклад, у процесі дегазації.

Суміші, представлені нижче лінії GA, такі як ті, які позначені точкою H, не стають займистими при змішуванні з ними повітря.

Слід зазначити, що можна перейти від однієї суміші, яка представлена точкою F, до іншої, яка представлена точкою H, шляхом подачі додаткової кількості інертного газу.

1.3. Аналіз основних технологічних операцій, що виконуються під час транспортування вантажів на судах-газовозах

1.3.1. Загальні поняття та вимоги до системи інертних газів

Перший досвід експлуатації таких великотоннажних танкерів показав їхню низьку надійність, пов'язану з вибухами в танках під час баластних переходів. Наступні дослідження показали, що причиною вибухів була статична електрика, потенціал якої збільшується пропорційно до розмірів танків. Додатковим фактором, що сприяє збільшенню потенціалу саморозряду статичної електрики в танках, є великий об'ємний питомий опір парів вуглеводнів, що досягає $10^{12} \dots 10^{14}$ см/м³.

Для підвищення безпеки судноплавства починаючи з 70-х років минулого століття, здійснюється впровадження систем інертних газів (СІГ) на нових та раніше збудованих танкерах з вантажомісткістю понад 40000 тонн. Для танкерів, що знаходяться на стапелях або на стадії проєктування, СІГ впроваджувалась, починаючи з вантажомісткості 20000 тонн і вище. При цьому використання СІГ не вимагалось, якщо температура спалаху вантажу, що перевозиться, була вище 60 °С в закритому тиглі [83, 84].

Міжурядова Асамблея ІМО 20.11.1973 року на восьмій сесії прийняла Резолюцію А.271 щодо основних правил застосування СІГ. Ця резолюція була включена до Міжнародної конвенції з охорони людського життя на морі 1974 р. (СОЛАС) у вигляді правила 62 глави 2 [82].

Відповідно до цих документів використання інертного газу розширилося та основним його призначенням стало запобігання вибухам на великотоннажних танкерах та зниження швидкості корозійних процесів. У цих документах з'явилися окремі однозначні визначення та формулювання, якими слід користуватися під час експлуатації СІГ та під час підготовки технічних документів. До них відносяться:

система інертних газів, призначена для подачі інертного газу або сумішей інертних газів до вантажних танків танкерів та суден-газовозів;

під системою інертного газу мається на увазі установка для вироблення інертного газу та система подачі інертного газу разом із засобами запобігання протитоку газів з вантажних танків, а також стаціонарні та переносні вимірювальні пристрої та прилади контролю;

інертний газ означає газ або суміш газів, що містять кисень у кількості, недостатній для підтримання горіння вуглеводнів;

інертний стан означає стан, за яким вміст кисню в атмосфері вантажного танку лише після додавання інертного газу не перевищує 8 % за об'ємом;

установка для вироблення інертного газу означає, що все обладнання спеціально змонтоване для отримання охолодження, очищення, нагнітання, контролю та регулювання подачі інертного газу в систему вантажних танків;

система розподілу інертного газу включає всі трубопроводи та пов'язану з ними арматуру, що використовуються для вироблення та подачі інертного газу у вантажні танки, захисту від надмірного тиску або вакууму, а також для видалення газів в атмосферу;

інертизація означає подачу інертного газу з метою створення у вантажних танках інертної атмосфери;

дегазація означає введення в танк свіжого повітря з метою видалення токсичних, займистих та інертних газів, а також збільшення концентрації кисню у вантажному танку до 21 % за об'ємом;

продування означає подачу інертного газу до вантажного танку, в якому вже створена інертна атмосфера з метою подальшого зменшення вмісту кисню або вуглеводневого газу до рівнів, нижче яких підтримка процесу горіння стає неможливою навіть у разі подальшого пуску повітря в танк;

додаткова подача інертного газу означає додавання в інертну атмосферу вантажного танка додаткової кількості інертних газів з метою підвищення тиску в танку та запобігання надходженню повітря в танк.

1.3.2. Система розподілу інертного газу

Система розподілу інертного газу разом із газовідвідною системою вантажного танка там, де це застосовно, повинна передбачати:

- засоби для подачі інертного газу у вантажні танки під час розвантаження, дебаластування та виконання операцій із зачистки танків, а також для додаткової подачі газу в танки;
- засоби для випуску в атмосферу газів, що знаходяться в танках під час навантаження вантажу і баластування;
- додаткові впускні або випускні труби для інертизації;
- засоби відсікання окремих танків від магістралі інертного газу для виконання дегазації;
- засоби захисту танків від надмірного тиску або вакууму [83, 84].

Для задоволення всіх цих взаємопов'язаних вимог можуть бути використані системи різноманітних конструкцій, а також різні способи їх експлуатації. Нижче розглянуто деякі основні конструкції систем та найважливіші особливості їх експлуатації. Крім того, наведено запобіжні заходи, що вживаються в процесі експлуатації таких систем. Усі ці пристрої повинні мати загальну характерну особливість, яка полягає в тому, що точки впуску і випуску інертного газу слід розташовувати у такий спосіб, щоб забезпечувалося ефективне заміщення газу у всьому об'ємі танка. У даний час на суднах-газовозах широко використовується одна із трьох схем пристроїв розподілу інертних газів по танках (таблиця 1.4).

Слід зазначити, що пристрої цих типів використовуються в умовах експлуатації не тільки для інертизації, але й для продування та дегазації танків.

Таблиця 1.4

Пристрої розподілу інертних газів по танках суден-газовозів

Тип пристрою	Розташування в танку		Метод заміни
	Впускний отвір	Випускний отвір	
I	Впускний отвір	Випускний отвір	Розведення
II	Верхня частина	Верхня частина	Розведення
III	Верхня частина	Днищова частина	Заміщення або розведення

Пристрій I типу. Впуск та випуск газів здійснюється з верхньої частини танка (рис. 1.3). Газообмін здійснюється шляхом розведення. Газ повинен завжди надходити в танк у такій спосіб, щоб забезпечувалося його проникнення на максимальну глибину танка і ефективне перемішування сумішей, що вводяться і видаляються у всьому об'єму танка. Випуск газів може здійснюватися через газовідвідну трубу кожного танка або загальну газовідвідну магістраль.

Пристрій II типу. Впуск газу здійснюється біля днища танка, а випуск – з його верхньої частини. Заміна газу у вантажному танку здійснюється шляхом розведення (рис. 1.4) .

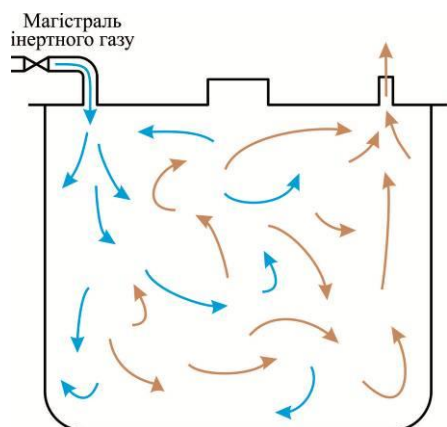


Рис. 1.3. Розведення (за допомогою пристрою I типу)

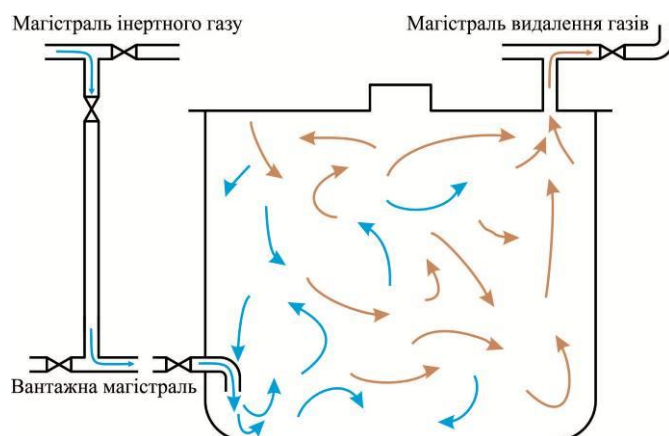


Рис. 1.4. Розведення (за допомогою пристрою II типу)

У пристрої цього типу газ надходить через з'єднання, розташовані між палубною магістраллю інертного газу (безпосередньо перед механічним неповоротним клапаном) і вантажними лініями днища (див. рис. 1.4). Може бути встановлений спеціальний вентилятор для дегазації. Газ, що видаляється, може бути випущений через автономні газовипускні труби або через магістраль інертного газу, якщо встановлені клапани, що відсікають кожен вантажний танк від цієї магістралі, якою газ потрапляє у щогловий стояк.

Пристрій III типу. Газ надходить у верхню частину танка, а виходить із його днищової частини (рис. 1.5, 1.6). Такий пристрій дозволяє проводити заміну газу методом заміщення (рис. 1.5), хоча і може переважати метод розведення, якщо різниця між густиною газу, що надходить і виходить, невелика або якщо швидкість газу при впуску висока (рис. 1.6). Часто патрубок для впуску інертного газу розміщується в горизонтальному положенні з метою зведення до мінімуму турбулентності поверхні розділу. Для випуску газу використовується спеціально встановлена для продування труба, яка знаходиться в межах 1 м від настилу другого дна.

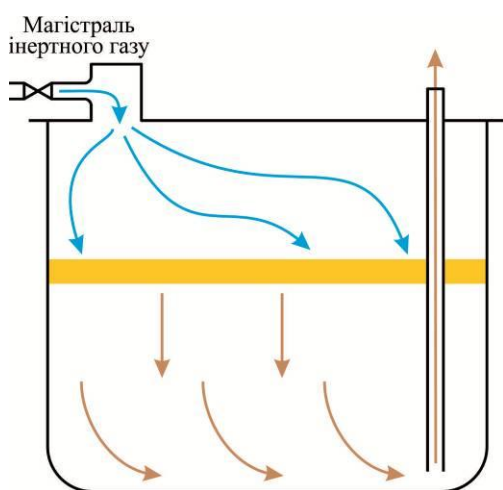


Рис. 1.5. Заміщення (за допомогою пристрою III типу)

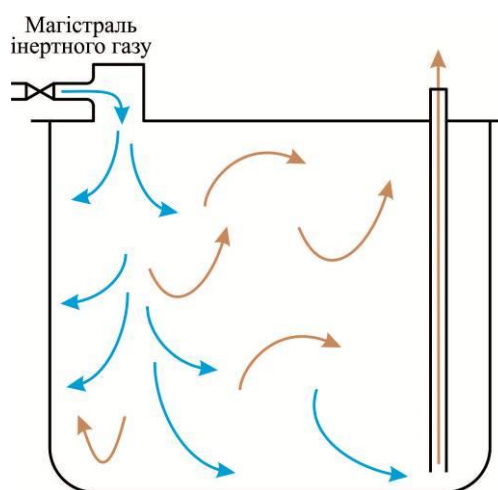


Рис. 1.6. Розведення (за допомогою пристрою III типу)

1.3.3. Методи заміни газу в танках

Заміна газу у вантажних танках можлива при використанні однієї з трьох нижче перелічених операцій: інертизації, продування, дегазації.

У кожній з цих операцій переважатиме один із двох процесів:

- розведення, яке є процесом змішування двох середовищ;
- заміщення, за якого газу, що подаються в танк, не змішуються з газами, що видаляються з танку, а утворюють з ними двошарову структуру. Метод заміщення досить ефективний у разі, коли густина середовища, що видаляється, значно вище того середовища, що подається [85, 86].

Ці два процеси значною мірою визначають спосіб контролю атмосфери в танку і пояснення отриманих результатів. Рис. 1.7, 1.8 свідчать, що для правильного пояснення показів, отриманих за допомогою відповідних приладів, необхідно зрозуміти сутність процесів розведення та заміщення газу, що фактично має місце всередині танка.

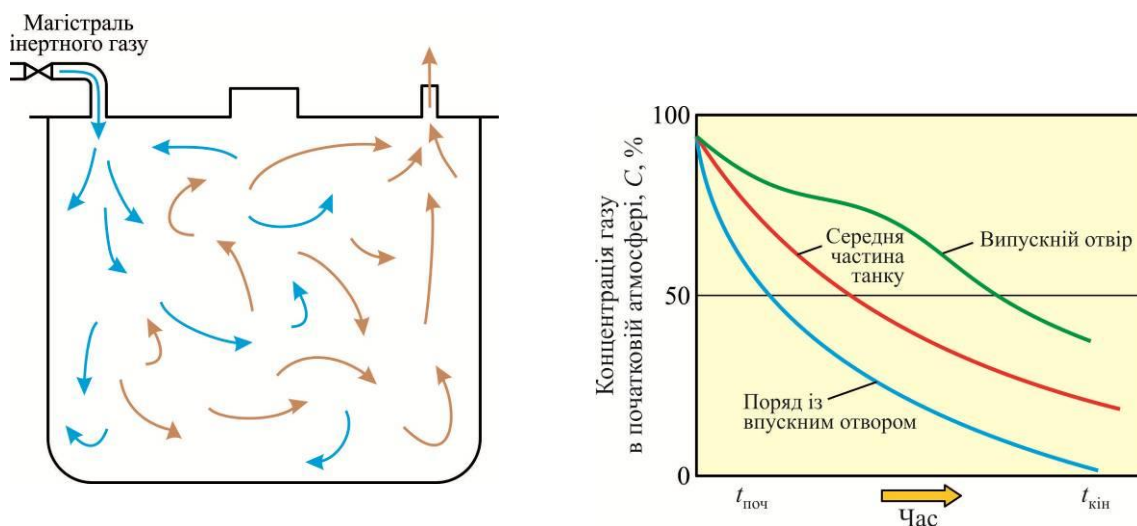


Рис. 1.7. Схема та графік видалення газів з танка методом розведення

Теорія розведення передбачає, що інертний газ, що надходить до танка, змішується з початковою атмосферою танка для отримання будь-якої однорідної газової суміші у всьому об'єму танка. Внаслідок цього концентрація газу в початковій атмосфері прогресивно зменшується.

Інтенсивність заміни газу залежить від обсягу газу, що надходить до танка, його швидкості під час потрапляння до танка і розмірів танка. Для повного заміщення газу необхідно, щоб під час його впуску до танку струмів інертного газу, що надходить, мав швидкість, достатню для досягнення дна танка. Рис. 1.7 демонструє схему впускного та випускного отворів, призначених для реалізації процесу розведення, турбулентність газового потоку всередині танка та характерні криві зміни концентрації газу за часом для трьох різних точок відбору проб [87].

Ідеальне заміщення вимагає стійкої горизонтальної поверхні поділу між легким газом, що надходить з верхньої частини танка, і більш важким газом, що витісняється з днищової частини танка через газовідвідний трубопровід. Цей метод вимагає, щоб газ, що подається в танк, мав відносно низьку швидкість. Це пов'язано з необхідністю збільшення густини газу, що подається шляхом поступового підвищення тиску до значень, що перевищують густину витисненого газу, тому що тільки в цьому випадку можливе забезпечення процесу заміщення. Рис. 1.8 відображає поверхню розділу між вхідними та вихідними газами та характерні криві зміни концентрації газу за часом для різних рівнів відбору проб.

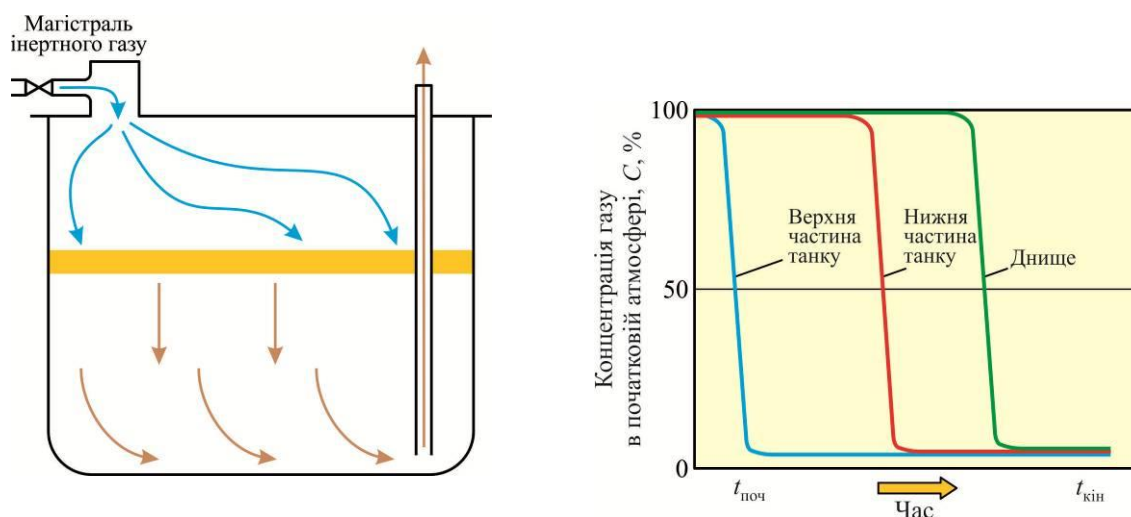


Рис. 1.8. Схема та графік видалення газів методом заміщення

1.3.4. Пристрої для випуску газів із танків

Для випуску газів з танка в атмосферу в процесі навантаження, баластування, а також зменшення надлишкового тиску газу в танку з метою виконання вимірів вручну і т.п. може бути встановлений пристрій одного з трьох основних видів:

- одинична газовідвідна система, що поєднується під час використання з палубною магістраллю інертного газу відвідними лініями інертного газу, що виходять з кожного танка, і випускає газ за допомогою одного або більше щоглових стояків або кількох високошвидкісних газовипускних клапанів (рис. 1.9);

- єдина система випуску газу з використанням автономної газовідвідної магістралі та газовідвідних ліній, що виходять з кожного танка, і, таким чином, що випускають газ в атмосферу за допомогою одного або більше щоглових стояків або високошвидкісних газовипускних клапанів (рис. 1.10);

- автономні високошвидкісні газовипускні пристрої, що встановлюються на кожному вантажному танку (рис. 1.11).

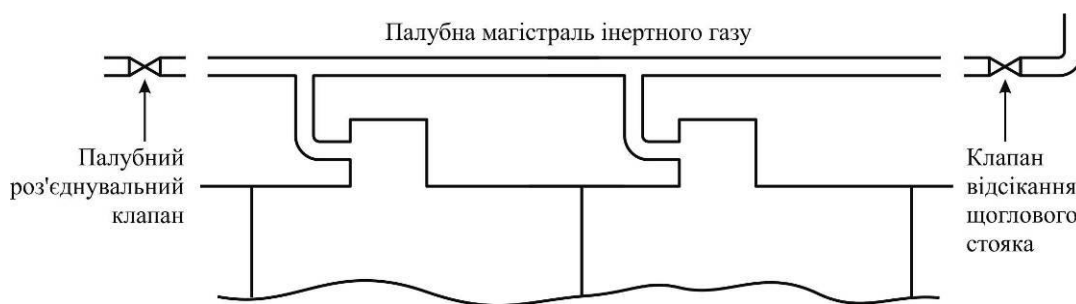


Рис. 1.9. Випуск газу через єдину палубну магістраль та одиничний щогловий стояк

Аналіз конструкцій газовипускних систем, представлених на рис. 1.9-1.11, дозволяє зробити висновок, що найбільш простий і менш металомісткою є схема, представлена на рис. 1.9. До переваг такої схеми слід віднести можливість використання трубопроводів системи інертного газу для видалення газів з танків шляхом перемикання двох клапанів.

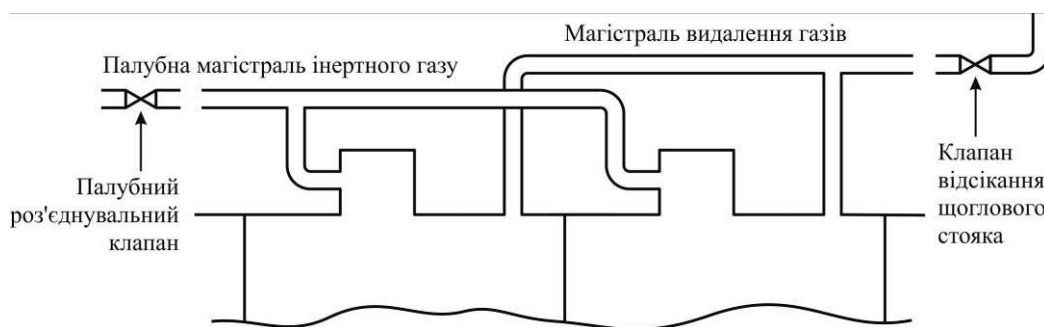


Рис. 1.10. Випуск газу через автономну магістраль та одиничний щогловий
СТОЯК

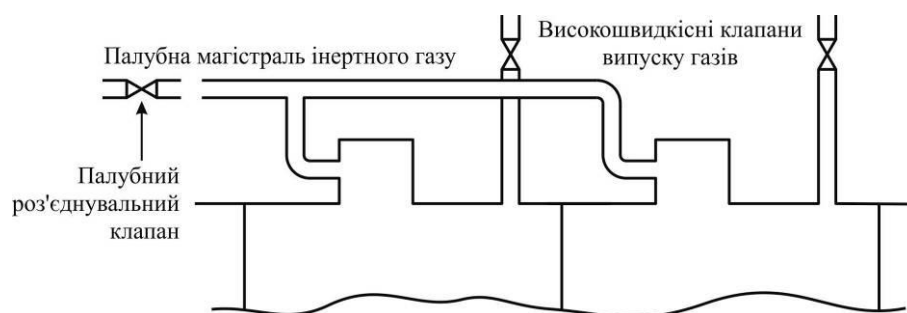


Рис. 1.11. Автономний випуск газу з танка за допомогою
високошвидкісних газовипускних пристроїв, встановлених на кожному
танку

Схема, представлена на рис. 1.10, більш маневрена, що дозволяє одночасно подавати гази в танки і видаляти їх в атмосферу. Кількість трубопроводів при цьому збільшується приблизно вдвічі, що пов'язано з додатковим обсягом робіт для палубної команди з підтримки суднових пристроїв у належному технічному стані.

Схема установки випуску газів із танків, представлена на рис. 1.11, найменш металомістка порівняно з вищерозглянутими. Індивідуальні газовідвідні пристрої, розташовані в межах кожного танка, не пов'язані між собою трубопроводами, що суттєво знижує її вагогабаритні показники. Наявність у ньому сопла, що перетворює потенційну енергію газу в кінетичну, забезпечує підйом газу, що видалається, до 20 м над палубою. Це дозволяє знизити висоту пристрою до 2,5...3 м. Підйом газу, що видалається з танків на таку висоту, визначається прагненням запобігти попаданню вуглеводневого газу на палубу і в окремі приміщення танкера.

1.4. Аналіз процесів, що відбуваються під час інертизації вантажних танків суден-газовозів

Інертизація вантажних танків суден забезпечує зниження вмісту в них кисню до рівня, який гарантує неможливість будь-якого займання – як вантажу, так і залишків парів вантажу або суміші газів, що знаходяться в танку. Як інертний газ можуть використовуватися випускні гази суднових дизелів і суднових парових котлів. При цьому вміст кисню у випускних газах парових котлів значно менший, ніж у випускних газах дизелів. Однак обсягу цих газів не завжди вистачає для повного наповнення всіх вантажних танків. Крім того, випускні гази в будь-якому випадку містять оксиди сірки, азоту і вуглецю, які негативно впливають на довкілля [88]. Тому найпоширенішим джерелом інертних газів на суднах є спеціальні генератори інертних газів. Те, який газ можна використовувати для інертизації вантажних танків, визначається вимогами фрахтувальника щодо мінімального вмісту кисню в атмосфері танка, точки роси, сумісності вантажу та інертного газу та іншими другорядними характеристиками [89, 90].

Як інертний газ може бути використаний азот, який або генерується на судні, або поставляється з берега. Як і будь-який інертний газ, азот є хімічно неактивним. У хімічні реакції з деякими елементами він може вступати тільки за високих тисків і температур у присутності каталізатора. Тому в нормальних умовах азот не входить у реакцію з вантажами, що перевозяться судами-газовозами. Азот, отримуваний у промислових цілях, містить у своєму складі не більше 0,0005 % кисню, що є безумовною гарантією неможливості будь-якого займання у вантажних танках [91, 92].

За своєю якістю та складом інертні гази, що генеруються судновою системою, значно поступаються азоту. У зв'язку з тим, що в суднових умовах інертні гази отримують спалюванням палива у спеціальній установці, у

їхньому складі завжди присутні механічні домішки, сажа, пари води, вуглекислий газ, а також продукти згоряння палива. Вміст кисню в інертних газах, що генеруються судновою системою залежно від її характеристик, знаходиться в діапазоні від 0,1 % до 5 % за об'ємом. Цього рівня, безумовно, також вистачає для безпеки суден-газовозів, але запас надійності цієї безпеки нижче ніж у випадку забезпечення процесу інертизації за допомогою азоту.

Перед черговим навантаженням вантажу необхідно проводити зачистку танків і вільних порожніх просторів (тобто виконувати заповнення їх газом, що має низький вміст кисню) – для забезпечення вибухобезпеки. Зачистку слід проводити доти, доки поки вміст кисню в атмосфері танка не опуститься нижче за вогнебезпечну межу. Максимально допустимий вміст кисню в інертному газі визначається Правилами Прапора або його встановлює судовласник [93, 94].

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

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

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

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

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

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

Необхідну кількість циклів Z визначають як:

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

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

m – ступінь розрідження [80].

Як показують розрахунки, метод продування є більш ефективним щодо економії енерговитрат та необхідного часу. Однак під час використання цього методу витрата інертного середовища виявляється дещо вищою, ніж під час вакуумування. Тим не менш у цьому випадку є можливість зменшити витрату інертного середовища, якщо здійснювати продування кількох танків, з'єднаних послідовно. Особливість такої схеми продування полягає в тому, що за умовою послідовного з'єднання перший по ходу продування танк від'єднують в момент досягнення в ньому необхідного значення концентрації попереднього вантажу. У ланцюг продування відповідно під'єднується наступний танк. Під час послідовного з'єднання танків подача інертного газу здійснюється одночасно у всі танки. Лише тільки в одному з танків досягається необхідне значення концентрації попереднього вантажу, подача інертного газу до нього припиняється. Використання методу послідовного продування здатне привести до досягнення відчутних переваг за витратами часу та інертного середовища. За витратою пари нового вантажу цей метод практично не відрізняється від описаного вище методу вакуумування.

Припускаючи, що у танку відбувається миттєве перемішування залишків вантажу з продувним газом, можна визначити час, що потрібний для отримання в танку необхідної концентрації попереднього вантажу [95, 96].

Цей час з достатньою точністю розраховується за наступною наближеною формулою

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

де t – необхідний час продування;

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

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

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

C – необхідна концентрація попереднього вантажу в танку.

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

Кратність обміну під час вакуумування визначають як

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

де V_h – об’ємна характеристика компресора;

$V_{\text{т}}$ – об’єм оброблюваного танка.

Кратність обміну під час продування знаходять за виразом

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

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

Справжні значення цих величин можуть відрізнятися від розрахункових. Спричинено це тим, що в різних танках можуть існувати різні форми газообміну – залежно від геометричної форми танка, відносного розташування його патрубків, що забезпечують потрапляння вантажу в танк та його вихід з танку. Також на форми газообміну впливають режими течії струменів і співвідношення густини продувного повітря та вантажу [97, 98].

Ще однією особливістю вантажних операцій на суднах-газовозах є заохолодження танків. Заохолодження вантажних танків здійснюють

безпосередньо перед прийомом вантажу, а також для підтримки зниженої температури у танках під час баластових переходів. Процес заходження дуже енергоємний, але його раціональне здійснення значно підвищує економічність перевезень зріджених газів морським шляхом.

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

Заходження вантажних танків, які перебувають у постійній експлуатації, здійснюють тільки шляхом розпилення зрідженого газу всередині танка. На метановозах природний газ надходить через спеціальні сопла (яких може бути 10...12), що розміщують у верхній частині вантажного танка. Протягом перших двох-трьох годин охолодження танка розпилення проводять з продуктивністю приблизно 1000 кг/год, потім продуктивність зростає у 5...6 разів. Після закінчення 14...18 год подібної операції температура вантажного танка сягає -115°C . За такого значення температури вже можна робити завантаження танків метаном.

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

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

Для просушування вантажних танків використовується сухе повітря, що подається всередину танка, з точкою роси -25°C . Танк можна вважати просущеним, коли повітря, що виходить з нього, матиме точку роси -20°C . Потім сухе повітря витісняють із танка інертним газом з точкою роси -45°C . Підготовка танка закінчується тоді, коли точка роси інертного газу, що виходить з танка, становить -40°C . Міжбар'єрний простір перед

охолодженням зазвичай заповнюють інертним газом під надлишковим тиском, оскільки в міру зниження температури відбувається стиснення інертного газу.

Під час транспортування зріджених нафтових газів зазвичай застосовують одну з таких трьох схем заохолодження танків.

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

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

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

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

Завантаження скраплених газів можна здійснювати різними способами, проте принципова схема обладнання та функціонування вантажної системи на газовозах однакова. На рис. 1.12 зображено принципову схему вантажної системи судна-газовоза.

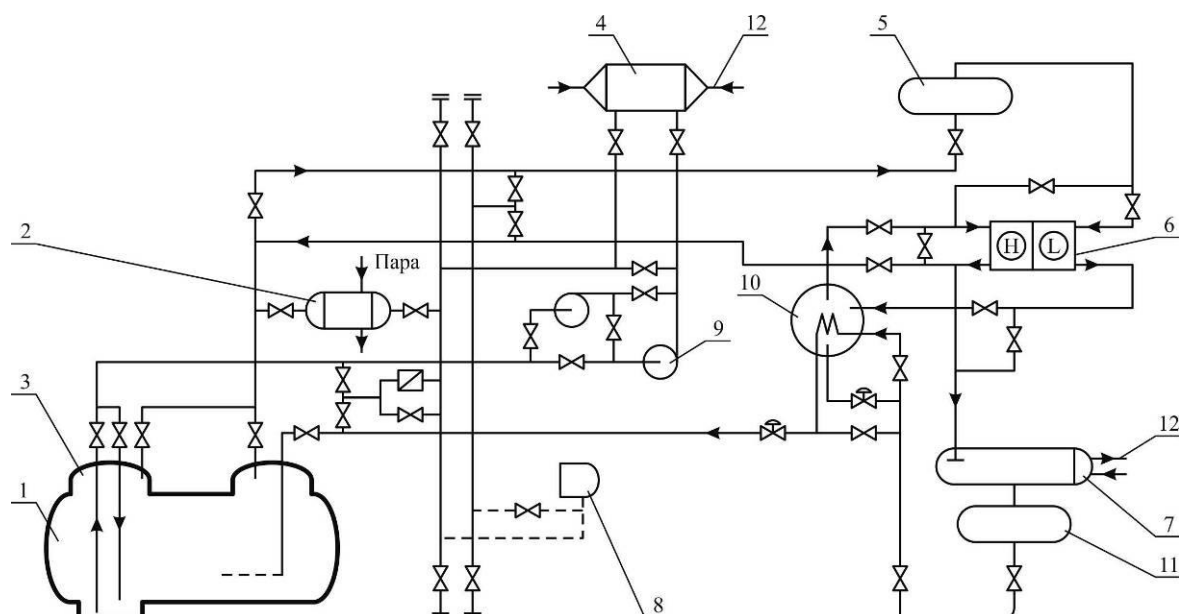


Рис. 1.12. Принципова схема вантажної системи судна-газовозу:

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

Перед навантаженням необхідно визначити максимально допустиму межу заповнення вантажного танка. Виконати це слід для того, щоб запобігти переповненню. Переповнення може статися, наприклад, у випадку нагрівання танка до температури навколишнього середовища у разі аварії або пожежі, оскільки для зріджених газів характерні значні коефіцієнти термічного розширення [97, 98].

Максимальний обсяг заповнення для будь-якого танка розраховують за формулою

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

де V_r – граничний обсяг заповнення танка за вказаної температури;

V – загальний обсяг танка;

d_b – густина вантажу за зазначеної температури;

d_l – густина вантажу за вантажних значень температури та тиску.

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

На рефрижераторних суднах запобіжні клапани танків встановлюють на відкриття за верхнім значенням тиску парів вантажу за максимальної температури, що досягається в циклі навантаження, перевезення та розвантаження [99, 100].

На багатьох суднах можуть існувати два або три настановні значення тиску в запобіжних клапанах (наприклад, 4 бар 0,3 бар). При цьому зниження значення тиску відкриття досягають шляхом пересування навантажувальної пружини, встановленої над клапаном. Нижчий настановний тиск у запобіжних клапанах дозволяє підвищити межі заповнення танка під час навантаження за низьких температур. Однак необхідно розуміти, що за таких умов підвищується ризик несподіваної втрати вантажу в разі порушення температури охолодження вантажу в акваторії гавані [101, 102].

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

Різниця між температурою вхідного вантажу і температурою стінок танка повинна бути мінімальною, щоб не сприяти виникненню підвищеної термічної напруги під час навантаження. Тому танки мають бути охолоджені

знизу. Нижнє охолодження танків досягається за рахунок введення рідкого вантажу через магістраль, що впорскує та нижню охолоджувальну лінію, за умовою малої та ретельно контрольованої швидкості її подачі. Якщо тиск досягає небажаних підвищених значень, пари вантажу слід повернути на берег або зробити їх скраплення, використовуючи суднові компресори.

Основні особливості процесів завантаження залежать від способів навантаження та передбачають нижчезазначене.

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

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

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

У разі навантаження хімічних продуктів. Навантаження хімічних продуктів зазвичай проводять за температурою довкілля, оскільки тиск, за якого знаходяться хімічні продукти, зазвичай нижче атмосферного. Здебільшого хімічні продукти завантажують у танки, які заповнені інертним газом чи азотом. Протягом рейсу виникає необхідність підвищення тиску усунення вакууму в танках (із застосуванням азоту). Охолодження хімічних продуктів можливе тільки за умови використання безпосередньо системи охолодження або системи зрідження. Для перевезення хімічних продуктів постачальники та перевізники розробляють додаткові вимоги.

На всіх рефрижераторних та напіврефрижераторних газозах у процесі навантаження необхідно ретельно контролювати температуру та тиск вантажу. На танкерах для перевезення скраплених нафтових газів контроль температури та тиску здійснюють шляхом зрідження википаючих парів газу та подальшого повернення їх у вантажні танки. Можливі випадки, коли під

час навантаження потрібно зменшувати температуру зрідженого газу-вантажу, щоб зменшити кількість вогнебезпечних газів, що виходять під час розвантаження. Виникає така ситуація внаслідок того, що температура вантажу у вантажних танках виявляється нижчою, ніж його температура у берегових танках. Залежно від типу вантажу та продуктивності рефрижераторної установки, а в деяких випадках і погодних умов, іноді для охолодження вантажу може знадобитися кілька днів.

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

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

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

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

1.5. Висновки за розділом 1 та постановка завдання дослідження

Як результат аналізу літературних джерел з розв'язання завдання забезпечення процесів інертизації вантажних танків суден-газовозів, що виконано в 1-му розділі визначимо таке.

1. Процес транспортування зріджених газів суднами-газовозами є неможливий без виконання спеціальних технологічних операцій, що характерні саме для цих типів суден морського транспорту. Однією з таких операцій є інертизація вантажних танків, основним завданням якої є зміна атмосфери вантажного танку та забезпечення такого її стану, який попереджує та робить неможливим будь-яке займання парів вантажу, які за тих чи інших обставин залишились у вантажному танку.

2. Генерація інертних газів на судах-газовозах можлива або за рахунок спалювання нафтового чи газового палива в спеціальних приладах та подальшого спрямування випускних газів до вантажних приміщень, або за рахунок використання безпосередньо чистих інертних газів, отримання яких можливо або з берегових постачальних комплексів, або в судових генераторах інертних газів як продукт розкладення повітря на азот та кисень.

3. Процес інертизації вантажних танків впливає на енергетичну ефективність та екологічну безпеку суден-газовозів. Основними способами інертизації вантажних танків є заміщення та розведення, кожний з яких має власні енергетичні та екологічні переваги.

4. У визначених умовах експлуатації суден-газовозів вкрай важливим стає завдання зниження енергетичних витрат та підвищення екологічної безпеки під час проведення інертизації вантажних танків.

5. З урахуванням викладеного, метою наукового дослідження визначено підвищення енергетичної ефективності та екологічної безпеки процесу інертизації вантажних танків суден-газовозів.

РОЗДІЛ 2. ЗАГАЛЬНА МЕТОДИКА ДИСЕРТАЦІЙНОГО ДОСЛІДЖЕННЯ

2.1. Вибір теми наукового дослідження

Будь-яка наукова кваліфікаційна робота є комплексною системою, яка складається з багатьох компонентів – теми, мети, наукової гіпотези, головного та допоміжних завдань, а також результатів їх розв’язання. Її невід’ємною частиною також є наукова значимість, практична цінність та наукове положення [103].

Вибору теми наукового дослідження передують запит практики – необхідність розв’язання окремого або пов’язаних між собою науково-прикладних завдань з певної галузі знань. З темою наукового дослідження також пов’язана його мета, для досягнення якої висувається наукова гіпотеза. Підтвердження наукової гіпотези досягається розв’язанням головного завдання дослідження, яке (у випадку його складності або багатополлярності) може бути декомпозовано на допоміжні завдання.

Наукове дослідження – це форма створення, фіксації та представлення знань щодо об’єкту, який досліджується. Мета завдання дослідження – теоретично створити / відтворити та репрезентувати досить повно образ об’єкта. Формулювання об’єкта та предмета дослідження – невід’ємний елемент дисертаційної роботи [104].

Предмет дослідження – поняття більш вузьке, ніж об’єкт дослідження (поняття ширше і первинне), і відбиває частину (елемент), аспект чи рису, ознаку чи характеристику суті, структури чи онтології об’єкта дослідження. Предмет – те, що досліджується в об’єкті (відносно об’єкта). У будь-якому науковому чи прикладному аналітичному дослідженні пізнається не весь об’єкт, а лише деякі його частини чи прояви. Тобто предмет перебуває у межах, не більших за об’єкт дослідження чи є проявом чогось партикулярного (приватного) в об’єкті.

Відповідно до методології наукового дослідження об'єкт – це те, що існує поза нами і незалежно від нашої свідомості, явище зовнішнього світу. Процес чи явище, куди спрямовано наукову діяльність. Предмет – будь-яке матеріальне явище, те, на що спрямована думка, якась науково-дослідницька дія. Об'єктом є матеріальна чи ідеальна система, а предметом – структура системи, взаємодія її елементів, різні властивості, закономірності розвитку і таке інше. Об'єкт дослідження – явище (процес), що містить протиріччя і породжує проблемну ситуацію. Предмет дослідження – найбільш значущі з погляду практики і теорії якості (сторони, особливості об'єкта), які підлягають вивченню.

Інтереляції понять «об'єкт» та «предмет» складні та різноманітні. Є розширювальне та обмежувальне тлумачення поняття «предмет», існують різні підходи до визначення його співвідношення з поняттям «об'єкт». Можуть мати місце суттєва неоднорідність та елемент невизначеності як об'єкта, так і предмета дослідження. Конкретна предметно-об'єктна область може описуватися безліччю концептів. Одночасно з цим щодо певного об'єкта дослідження можлива ціла лінійка (множина) формульованих (вибіркових) предметів, що відображають різні дослідні та інтерпретаційні проєкції, акценти і трасування, специфіку вихідних дослідницьких систем координат і відправних точок, відмінності в емпіричних та джерельних схемах.

Наукове дослідження може спочатку задаватися як багатопредметне та багатоаспектне. З іншого боку, той самий предмет може спочатку репрезентуватися через різні об'єкти [105].

Одним із важливих компонентів науково-дослідної діяльності є точне та коректне визначення об'єкт-предметних відношень, яке задає вихідну логіку майбутньому дослідженню. Однак їх розуміння найчастіше виявляється дуже складним для не фахівців у методології та теорії пізнання. Можливими причинами цього є, по-перше, дуалізм термінів об'єкт і предмет, що залежить від ситуаційних умов їх використання, а по-друге, відсутність певної традиції

актуалізації даного дуалізму поза специфічним методологічним і філософським контекстом, наприклад, в умовах реалізації пізнавальної активності в тій чи іншій конкретній дисциплінарній предметності. Однак і у філософії, і в методології опис об'єкт-предметних відношень дещо суперечливий і часто трансформується, виходячи з тієї позиції, яку займає про них, і тієї мети, яку він при цьому ставить.

Важливим моментом щодо об'єкт-предметних відношень у методологічному значенні є точне співвіднесення масштабу об'єкта стосовно предмета – може бути як мінімальним, і найзагальнішим; так в іншому випадку – за умови недостатнього масштабу віднесення об'єкта від предмета може бути не зовсім зрозуміла конкретика їх зв'язків і навіть самого принципу відокремлення предмета від об'єкта, а у випадку надмірного видалення – взагалі втрата сенсу їхнього співвідношення, що приймається під час дослідження.

Об'єкт та предмет дослідження не лише обираються, але також у випадку необхідності коригуються, виходячи з авторського задуму, з урахуванням авторських дослідницьких та інтерпретаційних проєкцій та вихідних дослідницьких систем координат, відправних точок, з урахуванням наявної (або такої, що підлягає збору) та оброблюваної емпіричної (такої, що досліджується) джерельної основи.

Тема дисертаційного дослідження також спрямовується відповідно до галузі знань та спеціальності, у якій вона виконується.

Відповідно до галузі знань «Транспорт» та спеціальності «Морський та внутрішній водний транспорт», а також спрямованості досліджень, що виконуються в Національному університеті «Одеська морська академія», темою наукового дослідження обрано «Оптимізація процесу інертизації вантажних танків суден-газовозів».

2.2. Визначення шляхів досягнення завдань дослідження

Не завжди компетентність і накопичений досвід однієї людини або отримані об'єктивні дані можуть бути використані як основа для прийняття серйозних рішень. Нерідко потрібно звертатися до думок кількох експертів. Результати експертизи, тобто оцінки та думки компетентних і досвідчених експертів щодо дослідження, можуть стати основою для прийняття серйозних рішень, рекомендованих дослідником. Експертні оцінки є найпоширенішим способом отримання та аналізу якісної інформації у ситуаціях, коли гостро відчувається нестача об'єктивних даних. Застосування суб'єктивних оцінок обумовлено необхідністю розв'язання завдань за відсутності низки спостережень за проявом аналогічних подій у минулому чи іншій об'єктивній інформації [106].

Метод експертних оцінок дозволяє розкрити та скласти «фотографічне поле проблем», підтвердити обґрунтованість та надійність дослідження, апробувати та «обкатати» наукові розробки, оцінити їх адекватність та перспективність, знайти підходи до розв'язання складних завдань, оцінити стан досліджуваних об'єктів, концептуалізувати мету дослідження, що проводиться, уточнити конкретні питання. При цьому експертні методи слід розглядати не як спосіб виявлення громадської думки, а як один із можливих підходів до всебічного вивчення складних явищ, у яких остаточне рішення має ухвалити людина.

Метод експертних оцінок – інтегральний метод збору, отримання, фіксації, узагальнення та інтерпретації оцінок стану проблеми чи завдання дослідження на основі безлічі незалежних суджень експертів (референтних за своєю професійною кваліфікацією та компетентністю предметів оцінювання), які ґрунтуються не на конкретних спостереженнях, а на своїх емпіричних та теоретичних експертних знаннях, професійному експертному досвіді [103].

Метод експертних оцінок є інтегральним методом, оскільки він охоплює різноманітність різних інструментальних методів та підходів – від простого опитування (анкетування) експертів, до переважно складних форм, які включають етап спеціальної складної обробки отриманих експертних думок методами математичної статистики.

Метод експертних оцінок використовується, зокрема, для розв'язання наступних завдань:

- прогнозування, якщо інформація щодо предмета дослідження недоступна чи неточна;
- прогнозування, якщо предмет прогнозування є новим і не має доступного еквівалента;
- докладний опис основних вимог до методу дослідження, пояснення процедури проведення дослідження, вибір методів і форм отримання та обробки даних;
- оцінка достовірності опитувань та їх коригування;
- докладний аналіз результатів та прогнозування змін у рамках дослідження;
- підтвердження та перевірка даних, отриманих за допомогою застосування інших методів проведення наукового дослідження;
- уточнення факторів, що впливають на розвиток предмета дослідження в рамках застосування методу моделювання.

Під час проведення експертної оцінки виділяють такі типи експертних знань:

- якісна інформація (експертна оцінка може вимагатися через відсутність доступної інформації, а також за необхідності швидкого прийняття рішень, зокрема, наприклад, для дослідження актуального статусу знань за відповідним тематичним спрямуванням);
- кількісна інформація (експертна оцінка може вимагатися у випадках, коли відсутні емпіричні дані з певної тематики або їх неможливо зібрати, а також коли терміни, що відведені на проведення дослідження, є занадто

короткими; така інформація може вимагатися, крім того, під час дослідження рідкісних зразків досліджуваних об'єктів, а також коли об'єкт дослідження – поза доступом);

- доповнення (експертна оцінка може вимагатися, зокрема, через наявність прогалин в емпіричних даних або їх невизначеності);

- ідеї та рішення (експертна оцінка може вимагатися, зокрема, через надмірну складність досліджуваних питань).

2.3. Використання системного підходу під час розв'язання завдань наукового дослідження

Широкий спектр взаємопов'язаних завдань наукового дослідження вимагає щодо свого розв'язання застосування системного підходу – саме в цьому випадку враховуються всі основні фактори, що впливають на досягнення мети дослідження.

Будь-який об'єкт можна розглядати як частину системи, з одного боку, з другого, як систему, що з безлічі пов'язаних між собою підсистем, кожна з яких утворена безліччю інших підсистем і безліччю нероздільних у смислі аналізованої системи елементів. Структуру об'єкта усталено називати сутністю, тоді як зовнішні форми її прояву – явищем. Остання категорія визначає властивості та відношення об'єкта, якими і пізнаються імпліцитні властивості сутності. Її наукове дослідження (опис, аналіз, прогноз) проводиться опосередковано вивченням явища за зареєстрованими результатами спостережень, які фіксують стан об'єкта та його зв'язки. Суб'єкт висуває та перевіряє гіпотезу щодо структури сутності [107].

У міру накопичення знань (використовуються теоретичний та практичний методи) уявлення щодо об'єкту можуть змінюватись під час незмінної його сутності. Її зовнішні форми прояву вивчаються на

теоретичному та емпіричному рівнях пізнання з утворенням безлічі нових теоретичних та емпіричних об'єктів. У процесі пізнавальної діяльності напрям руху пізнання може багаторазово змінюватися: від теорії до емпірії, і навпаки, від емпірії до теорії, – результат завжди абстракція, яка є не синтезована копія об'єкта, що заміщається, а одна з форм адекватного представлення його властивостей, суттєвих для суб'єкта.

Незважаючи на те, що вибір форми подання суб'єктивний, властивості, що відображаються, об'єктивно характеризують поточний стан сутності об'єкта. Результат моделювання залежить від суб'єктивного формування абстракції, що є серйозною проблемою.

Об'єкт може бути досить простим за складом, структурою, у ньому важко виділити будь-які частини, тобто в деякому сенсі є єдиним цілим, але може бути і так, що той самий об'єкт має складну внутрішню структуру, в якій вбачаються окремі частини, однорідні за якоюсь властивістю всередині цієї частини. Неподільні частини цілого зазвичай називають елементами. Оскільки все у світі пов'язане, то можна очікувати, що і між цілісним об'єктом, і між частинами (елементами) всередині самого об'єкта існують просторово-часові відносини, наприклад: ендогенні, екзогенні і, можливо, латентні. Проблема цілого та частини в рамках діалектики полягає в тому, що ціле характеризується новими якостями та властивостями, які не притаманні окремим частинам (елементам), але виникають у результаті їх взаємодії у певній системі зв'язків.

Аналіз діалектичного взаємозв'язку частини та цілого є найважливішим методологічним принципом наукового пізнання. Парадигма зафіксованих відношень визначає метод дослідження, узагальнена схема якого: вивчення цілого, потім аналіз, діалектичне виділення частин та їх дослідження, далі – теоретичний синтез об'єкта у формі конкретного цілого (за умови, що ціле та частини розглядаються спільно) та, нарешті, його вивчення (перевірка гіпотези відносно структури сутності) з подальшою інтерпретацією цілого.

Для наукового дослідження конкретного, його сутності, застосовують метод абстракції, сутність якого полягає у спрощенні явища шляхом відкидання несуттєвих та виділення суттєвих ознак – у класифікації безлічі елементів на так звані класи абстракції, усередині яких усі елементи однорідні (близькі між собою за якимись властивостями).

Абстракція, клас абстракції, є в певному сенсі модель, це новий об'єкт, спрощена форма цілісного конкретного, кінцева мета моделювання.

Розв'язання проблеми побудови адекватної онтологічної інтерпретації абстрактних понять має не лише науковий, а й практичний інтерес: науковець повинен вміти створювати модель та перевіряти її на адекватність (тобто перевіряти точність відтворення у моделі об'єктивних зв'язків та відношень).

Системний підхід до розв'язання завдань наукового дослідження передбачає взаємопов'язане використання аналізу та синтезу. Аналіз та синтез переважно є підґрунтям усіх видів пізнавальної діяльності людей. Під час виконання власної дослідницької роботи головна мета аналітико-синтетичної переробки інформації, що міститься в деякій кількості джерел, полягає у вилученні з цієї множини нових фактів і відомостей, у явному вигляді в них не виражених, але виведених логічним шляхом із залученням екстралінгвістичної інформації [103, 108].

У випадках, коли на рівні спостереження за явищем фіксуються зовнішні його ознаки, але неможливо або вкрай важко релевантно розкрити його сутність, властивості та поведінку, наукове пізнання вимагає глибшого його дослідження та осмислення, і тоді таке пізнання реалізується застосуванням низки спеціальних дослідницьких методів, передусім – методу аналізу.

Метод аналізу є одним з основних широко застосовуваних методів наукового осмислення та пізнання. Серед інших цей метод використовується також під час проведення науково-прикладних та аналітичних досліджень.

Найважливішим параметром аналізу є декомпозиція (розбиття, деконструювання, розбір), за якою вже визначаються одиниці композиції.

Аналіз можна розділити на три групи понять.

Першу групу утворюють поняття, сукупність яких характеризує і задає площину об'єктів, що розглядаються:

1) діючий елемент, під яким розуміється матеріальний предмет, який певним чином залежить від інших матеріальних предметів і певним чином впливає на ці предмети – його оточення;

2) зв'язки елементів, які визначаються як перетворення напрямків, що описують стан елементів;

3) система – сукупність взаємозалежних діючих елементів;

4) структура – мережа зв'язків між елементами.

Другу групу складають поняття, запозичені з кібернетики, які використовуються для декомпозиції та опису станів об'єктів першої площини:

1) входи та виходи елементів та систем;

2) рівновага систем;

3) стабільність систем;

4) саморегуляція систем.

До третьої групи входять поняття, що сприяють досягненням цілей формального опису досліджуваних у цій концепції понять, тобто понять у перших двох групах.

Під час виконання аналізу можливе виділення наступної видової таксономії (системи класифікацій) методів аналізу:

1) на підставі характеру:

порівняльний аналіз;

дескриптивний аналіз;

чисельно-символьний аналіз;

2) з предметної основи:

структурно-функціональний аналіз;

- морфологічний аналіз;
- реляційний аналіз;
- операційно-процедурний аналіз;
- параметричний аналіз;
- 3) на підставі масштабу (у міру охоплення):
 - комплексний (системний) аналіз;
 - вибірковий (зокрема локальний) аналіз;
- 4) на підставі хронологічної (тимчасової) прив'язки:
 - оперативний (нетривалий) аналіз;
 - середньотривалий аналіз;
 - довготривалий аналіз;
- 5) на підставі хронологічної (тимчасової) спрямованості:
 - ретроспективний аналіз;
 - поточний аналіз;
 - перспективний аналіз;
- 6) на підставі міри статичності:
 - динамічний аналіз;
 - статичний аналіз.

Метод синтезу – один із лінійки основних, таких, що широко застосовуються як методи наукового осмислення та пізнання. Серед інших цей метод використовується і під час проведення науково-прикладних та аналітичних досліджень.

Синтез у науці – це складний когнітивний ментальний процес, спрямований на отримання нового з наявних наукових матеріалів, переважно отриманих у результаті аналізу, у вигляді складного їх поєднання в єдине ціле. Саме науковий синтез безлічі частин (або теоретичних одиниць) дозволяє отримати теоретичну, таку, що раніше не існувала, або інструментальну сутність – науковий результат. Саме науковий результат має синергетичний ефект, який:

- відображає наявність у цілісній (синтезованій) системі властивостей цілісності та, зокрема, незведення її властивостей до суми (сукупності) властивостей її компонентів;

- характеризує наявність у системі специфічних властивостей та потенціалів, яких позбавлені її підсистеми та елементи та які утворюються в результаті синергетичного поєднання та сполучення властивостей та потенціалів, підсистем та елементів;

- забезпечує систему певною самостійністю стосовно складових її елементів.

Однією з найважливіших об'єктивних передумов синтезу є структурність матеріальних об'єктів, здатність їх елементів до перегрупування, об'єднання та роз'єднання.

Цілі методу наукового синтезу включають:

- розвиток глибшого розуміння досліджуваного феномена за рахунок виявлення прихованих зв'язків і якостей, отримання інших імпліцитних знань;

- формування наукових моделей, наукових концептів та інших наукових конструктів,

- створення нових наукових теорій та суттєвий розвиток наявних наукових теорій;

- вироблення (конструювання) якісно нових наукових дефініцій;

- вироблення (конструювання) якісно нових наукових класифікацій та таксономій;

- визначення поточних досліджень нових галузей і напрямів практики та дослідження [109].

Розв'язання завдань виконаного дослідження було забезпечено такими методами.

Дедукції, з якого логічним шляхом окремого положення виводиться із загального (відбиваючи рух від загального до окремого) та із загального

(узагальненого) знання виводиться знання «одиничне», одної із широко використовуваних науково-дослідних і прикладних аналітичних методів.

Індукції, з якого логічним шляхом загальне положення виводиться з окремого положення чи набору таких (відбиваючи рух від окремого до загального) і з окремого («одиничного») знання виводиться загальне (узагальнене) знання, одної із широко використовуваних науково-дослідних та прикладних аналітичних методів.

Класифікації – який є одним із найважливіших методів наукового пізнання, осмислення та опису закономірностей навколишнього світу, є формою так званого контрольованого пізнання та однією з опор емпіричного знання, що використовується для впорядкування знань. Класифікація – це діяльність із визначення приналежності будь-якого об'єкта до певної категорії відповідно до характеристик такого об'єкта.

Моделювання – що відноситься до таких, що найбільш активно та широко використовуються під час проведення науково-дослідних та науково-прикладних робіт.

Аксіоматичний метод наукового пізнання, що широко використовуються в науці, а також є одним із методів аналітики як роду інтелектуальної діяльності (не пов'язаної зі здобуттям нового наукового або систематизованого наукового знання, але, зрозуміло, заснованого на науковій методології).

Метод абдукції, як пізнавальна процедура висування гіпотез та оперування ними, – один із основних методів наукових досліджень та породження нових або суттєво систематизованих наукових знань.

Спостереження – це один із найбільш поширених та універсальних методів проведення досліджень.

Апроксимації – як шлях грубих наближень є відносно неточним, однак таким, що має дуже великий потенціал, та дає змогу переконатися, чи правильні уявлення відносно чого-небудь. Названий метод є одним із методів наукових досліджень та прикладної аналітики.

Експеримент, який згідно з відомими дефініціями та поясненнями – рід досліду, що має цілеспрямовано дослідницький, методичний характер, що проводиться у спеціально заданих, відтворюваних умовах шляхом їхньої контрольованої зміни. Експеримент – це метод наукового пізнання, за допомогою якого досліджуються явища реально-предметної дійсності в певних (заданих), відтворюваних умовах шляхом їхньої контрольованої зміни. Експериментальне дослідження відноситься до емпіричних наукових методів і є різновидом досліду, що має цілеспрямовано пізнавальний, методичний характер. Експеримент займає чільне місце серед методів наукового пізнання та часто виконує функцію критерію істинності наукового знання загалом.

Стосовно виконаного дослідження об'єктом дослідження обрано процес транспортування зрідженого природного газу суднами-газовозами. Як предмет дослідження визначено процес інертизації вантажних танків суден-газовозів.

Підставою будь-якого дослідження щодо розв'язання науково-прикладного завдання є запит практики, спрямований на знаходження рішення одного окремого чи декількох завдань, що пов'язані з тематикою дослідження.

Відносно обраної теми дисертаційного дослідження, якою обрана «Оптимізація процесу інертизації вантажних танків суден-газовозів», як запити практики були визначені:

- забезпечення процесу інертизації вантажних танків суден-газовозів;
- діагностування стану атмосфери вантажних танків під час проведення їх інертизації;
- зниження енергетичних витрат та підвищення екологічної безпеки під час проведення інертизації вантажних танків суден-газовозів.

Відповідно до методології наукових досліджень та принципів системного підходу мета дисертаційного дослідження повинна бути пов'язана з її темою та визначати основні результати, які передбачені

дослідженням. З урахуванням цього, метою дослідження обрано підвищення енергетичної ефективності та екологічної безпеки процесу інертизації вантажних танків суден-газовозів.

Гіпотезою наукового дослідження є теза, що підвищення енергетичної ефективності та екологічної безпеки процесу інертизації вантажних танків суден-газовозів досягається керованим впливом на концентрацію азоту (який використовується як інертний газ) в атмосфері вантажного танку та підтриманням суцільності розділювального шару, що попереджує сумішутворення між парами вантажу, які залишились у вантажному танку, та інертним газом, який подається до вантажного танка.

Головним завданням дослідження є управління суцільністю та рухом розділювального шару, який попереджує сумішутворення між парами вантажу, що залишились у вантажному танку та інертним газом, що подається до вантажного танка під час забезпечення процесу інертизації.

Розв'язання головного завдання досягається шляхом розв'язання наступних допоміжних завдань:

- визначення якісного та кількісного показників процесу інертизації вантажних танків суден-газовозів;
- визначення енергетичної ефективності процесу інертизації вантажних танків суден-газовозів;
- визначення екологічної ефективності процесу інертизації вантажних танків суден-газовозів.

Для кожного з допоміжних завдань було отримано науковий результат, синтез яких забезпечив розв'язання головного завдання дисертаційного дослідження. Це дозволило визначити науковий результат та наукову значимість дослідження, а також сформулювати наукове положення.

На підставі принципів системного підходу була розроблена технологічна карта наукового дослідження, яка надана на рис. 2.1.

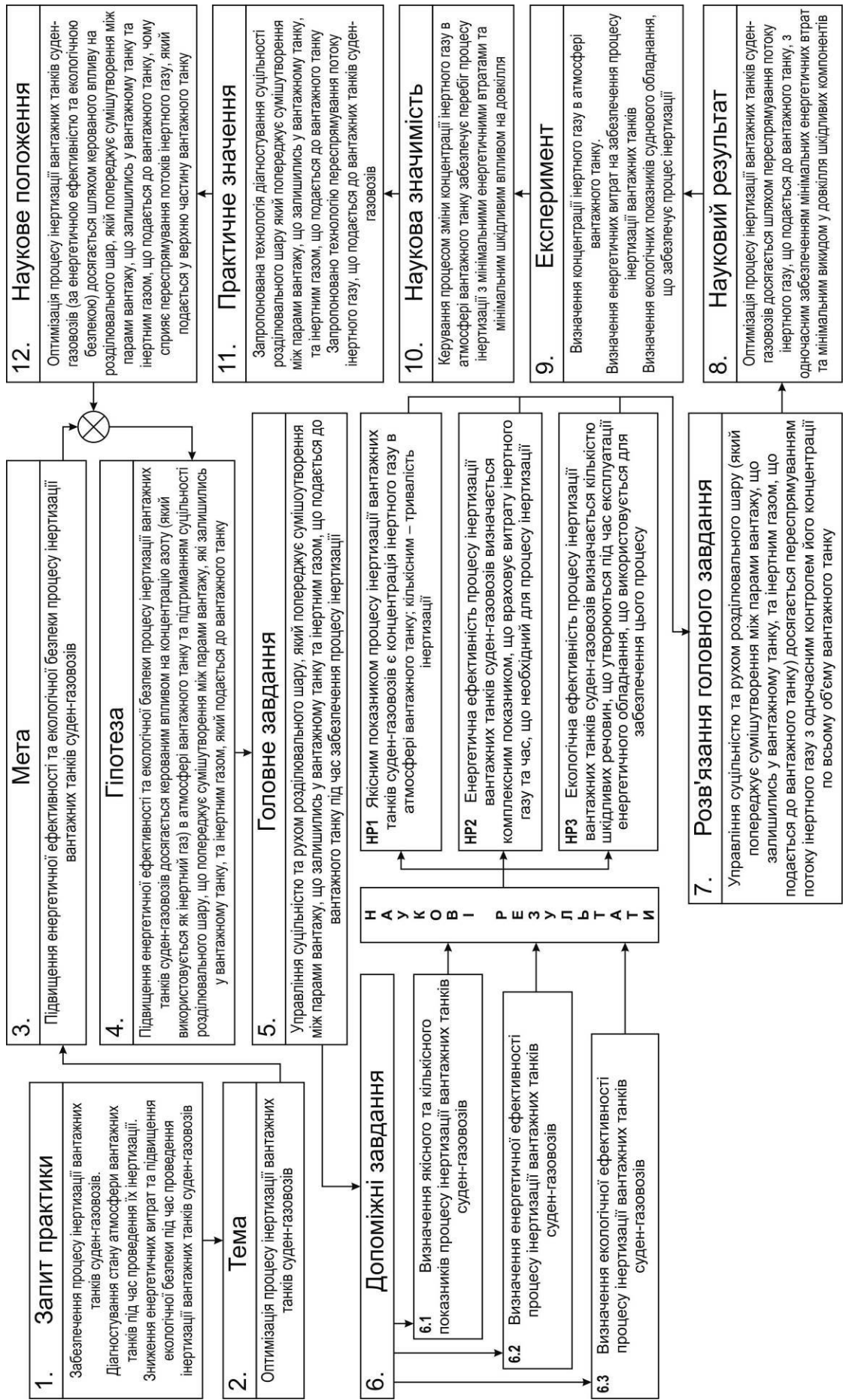


Рис. 2.1. Технологічна карта наукового дослідження

2.4. Організація та забезпечення проведення експериментальних досліджень

Головною метою експерименту може бути виявлення властивостей досліджуваних об'єктів і навіть перевірка справедливості гіпотез. Потім, на цій підставі, здійснюється всебічне і глибоке вивчення теми наукового дослідження [110].

Основою експерименту є науково поставлений дослід, у якому вивчення явищ відбувається з урахуванням обраних чи штучно створених умов, які забезпечують перебіг процесів, необхідне встановлення закономірних зв'язків між явищами.

Постановка та організація експерименту визначається його призначенням. За своїм напрямом експерименти дуже різноманітні і кожен із них має власні специфічні особливості. Насамперед ці особливості визначаються тим, у якій галузі науки проводиться експеримент. Відповідно до цього розрізняють експерименти: фізичні, хімічні, технічні, соціальні та ін. Також експерименти класифікують за більш конкретними ознаками:

- за способом формування умов – природні та штучні. Природний експеримент передбачає проведення дослідів у звичних для досліджуваного об'єкта умовах існування (найчастіше застосовується у біологічних, соціальних, психологічних та педагогічних дослідженнях). Штучний експеримент передбачає створення штучних умов щодо його проведення (застосовується у природничих і технічних науках);

- за метою дослідження – перетворювальні, констатуючі, контролюючі, пошукові. Перетворювальний (або творчий) експеримент передбачає активну зміну структури та функцій об'єкта дослідження відповідно до висунутої гіпотези, формування нових зв'язків та відношень між компонентами об'єкта або між досліджуваним об'єктом та іншими об'єктами. Констатуючий експеримент застосовується для перевірки певних припущень. Під час такого

експерименту констатується наявність певних зв'язків між впливом на об'єкт дослідження та досягнутим результатом, встановлюється наявність певних фактів. Контролюючий експеримент зводиться до контролю за результатами зовнішнього впливу на об'єкт дослідження з урахуванням його стану, характеру цього впливу та очікуваного ефекту. Пошуковий експеримент проводиться у випадку, коли важко розділити чинники, що впливають на досліджуване явище внаслідок відсутності достатніх попередніх (апріорних) даних. За результатами пошукового експерименту встановлюється значущість факторів, здійснюється виключення тих, що мають незначний вплив;

- з організації проведення – лабораторні, натурні, виробничі та інші. Лабораторний експеримент проводять у лабораторних умовах із застосуванням типових приладів, спеціальних моделювальних пристроїв, стендів тощо. Найчастіше у лабораторному експерименті вивчається не сам об'єкт, а його зразок. Такий експеримент дає можливість якісно та з потрібною повторюваністю вивчити вплив одних характеристик, одночасно варіюючи інші, отримати переконливу наукову інформацію з мінімальними витратами часу та ресурсів. Але такий експеримент не завжди повністю моделює реальний хід процесу, що досліджується, і тому виникає потреба проводити натурний експеримент. Натурний експеримент проводять у звичайних (природних) умовах та на реальних об'єктах. Цей вид експерименту часто застосовують у процесі натурних випробувань технічних об'єктів. Залежно від місця проведення випробувань натурні експерименти можуть бути виробничими, технологічними, напівнатурними тощо. Головна наукова проблема натурального експерименту – забезпечити достатню відповідність (адекватність) умов його проведення реальній ситуації, в якій працюватиме надалі досліджуваний об'єкт;

- за структурою досліджуваних об'єктів та явищ – прості та складні. Простий експеримент застосовується для вивчення нескладних структурою об'єктів, які мають невелику кількість взаємозалежних і взаємодіючих

елементів, кожен із яких виконує найпростішу функцію. Складний експеримент вивчає явища або об'єкти зі складною структурою та великою кількістю взаємопов'язаних та взаємодіючих елементів, кожен із яких виконує складні функції. У такому разі зміна стану будь-якого елемента чи зв'язку призводить до зміни стану багатьох інших елементів системи;

- за характером взаємодії засоби експериментального дослідження з об'єктом дослідження – звичайні та змодельовані. Звичайний (класичний) експеримент включає експериментатора як суб'єкта пізнання, і навіть об'єкт чи предмет експериментального дослідження та засоби (інструменти, прилади тощо), з допомоги яких здійснюється експеримент. У звичайному експерименті експериментальні засоби безпосередньо взаємодіють з об'єктом, що досліджується. Вони стають посередниками між експериментатором та об'єктом дослідження. Змодельований експеримент, на відміну від звичайного, має справу з моделлю об'єкта, що досліджується. Модель входить до складу експериментальної установки, замінюючи як об'єкт дослідження, котрий іноді умовний, у яких вивчається деякий об'єкт;

- за контрольованими величинами – пасивні та активні. Пасивний експеримент передбачає вивчення лише обраних при цьому показників (параметрів, змінних) з урахуванням спостереження за об'єктом без штучного втручання у його функціонування. Прикладами пасивного експерименту може бути спостереження за якимись процесами, подіями тощо. Тому пасивний експеримент можна вважати власне спостереженням (в якості методу дослідження), що супроводжується інструментальними вимірюваннями показників стану об'єкта дослідження. Активний експеримент пов'язаний з вибором спеціальних вхідних факторів та контролем за тим, що відбувається з об'єктом дослідження під впливом цих факторів;

- за кількістю факторів, що варіюються – однофакторні та багатофакторні. Однофакторний експеримент передбачає виділення необхідних для вивчення чинників та визначення кожного їх окремо.

Багатофакторний експеримент передбачає вивчення всіх виділених на дослідження чинників одночасно у такій взаємодії.

Наведена класифікація експериментальних досліджень не є остаточною та повною, адже розвиток наукового пізнання постійно призведе до розширення меж застосування експериментального методу. Крім того, залежно від завдань експерименту, різні його види можуть об'єднуватися, утворюючи комплексний або комбінований експеримент (що саме найчастіше відбувається в реальних дослідженнях).

Підготовка до проведення експериментального дослідження передбачає виконання таких дій:

- розробку гіпотези, яка підлягатиме експериментальній перевірці;
- складання програми експериментальних робіт;
- визначення способів та прийомів для об'єкта дослідження;
- забезпечення умов для здійснення процедури експериментальних робіт;
- розробку прийомів фіксування проміжних та кінцевих результатів експерименту;
- підготовку експериментальних засобів (приладів, установок, моделей тощо);
- визначення та підготовку учасників експериментального дослідження.

На початок експерименту складається план (програма) його проведення. У ньому формулюють мету та завдання експерименту; визначають об'єкт, що підлягає експериментальній перевірці; обґрунтовують обсяг експерименту, кількість дослідів, послідовність їхньої реалізації; визначають чинники впливу на об'єкт дослідження, у якій послідовності вони змінюватимуться у процесі експерименту; обґрунтовують засоби вимірювань; визначають способи обробки та аналізу експериментальних матеріалів.

Проводиться експеримент на основі попередньо розробленої методики експерименту. Методика експерименту – це сукупність розумових та

реальних операцій, упорядкованих у певній послідовності, відповідно до якої досягається мета дослідження.

У методиці докладно розкривається процес експерименту, визначається послідовність проведення необхідних вимірювань та спостережень, описується кожна експериментальна дія з урахуванням обраних для проведення експерименту засобів, обґрунтовуються методи контролю якості експериментальних дій, які повинні забезпечувати за мінімальної (попередньо встановленої) кількості вимірювань високу надійність та задану точність. Розробляються форми протоколів (або таблиць) для фіксації результатів спостережень та вимірювань.

Залежно від теми наукового дослідження обсяг експерименту може бути різним. У кращому випадку, щоб підтвердити гіпотезу дослідження, достатньо провести лише лабораторний експеримент. Але можлива потреба й у проведенні цілої серії експериментальних досліджень: попередніх (пошукових), лабораторних, на дослідних зразках у реальних умовах їх функціонування (з виробництва) тощо [111].

2.5. Обладнання, пристрої та вимірювальні прилади під час проведення експериментальних досліджень

Під час експериментальних досліджень, які виконувались на суднах-газовозах різної вантажомісткості, використовувалося спеціальне обладнання, пристрої та вимірювальні прилади, що дозволяли визначити необхідні експлуатаційні показники суднових енергетичних установок, необхідні технологічні показники суднової системи генерації інертного газу та фізичні показники зріджених природних газів, що транспортувались як вантаж.

Експлуатаційні показники суднових дизель-генераторів MAN-Diesel&Turbo контролювались за допомогою:

1) витратомірів потоку палива:

- модель Siemens SITRANS F M Flow Sensor;
- модель Honeywell SmartLine ST700 Flow Transmitter;
- модель Endress+Hauser Proline Promass Coriolis Flowmeter;

2) ватметрами вимірювання потужності:

- модель Ashcroft 1008S Pressure Transmitter;
- модель WIKA S-10 Pressure Transmitter;
- модель Emerson Rosemount 3051S Pressure Transmitter.

Технологічні показники суднової системи генерації інертного газу визначались через вимірювання:

1) продуктивності генератора інертних газів за допомогою витратомірів:

- модель Siemens SITRANS F M Flow Sensor;
- модель Honeywell SmartLine ST700 Flow Transmitter;

2) датчиків тиску інертного газу:

- модель: Kistler Piezoelectric Cylinder Pressure Sensor;
- модель: Bosch Automotive Pressure and Temperature Sensor;
- модель: AVL Cylinder Pressure Sensor.

Фізичні показники зріджених природних газів, що транспортувались як вантаж, визначались за допомогою:

1) газоаналізаторів:

- моделі Testo350 та Testo380;
- модель Clipper 210;

2) датчиків рівня:

- моделі FlyLine2046;
- модель Dupery177.

2.6. Висновки за розділом 2

1. З урахуванням галузі знань 27 – транспорт, спеціальності 271 – морський та внутрішній водний транспорт; на підставі обов’язкового виконання вимог щодо забезпечення енергетичних та екологічних показників роботи морських та річкових суден та їх енергетичних установок; враховуючи запити практики, а саме забезпечення процесу інертизації вантажних танків суден-газовозів, діагностування стану атмосфери вантажних танків під час проведення їх інертизації, зниження енергетичних витрат та підвищення екологічної безпеки під час проведення інертизації вантажних танків суден-газовозів:

сформульована тема наукового дослідження – «Оптимізація процесу інертизації вантажних танків суден-газовозів»;

визначена мета дослідження – підвищення енергетичної ефективності та екологічної безпеки процесу інертизації вантажних танків суден-газовозів;

встановлено головне завдання дослідження – управління суцільністю та рухом розділювального шару, який попереджує сумішутворення між парами вантажу, що залишились у вантажному танку та інертним газом, що подається до вантажного танка під час забезпечення процесу інертизації, а також наступні допоміжні завдання: 1) визначення якісного та кількісного показників процесу інертизації вантажних танків суден-газовозів; 2) визначення енергетичної ефективності процесу інертизації вантажних танків суден-газовозів; 3) визначення екологічної ефективності процесу інертизації вантажних танків суден-газовозів.

2. Об’єктом дослідження визначено процес транспортування зрідженого природного газу суднами-газовозами. Предмет дослідження – процес інертизації вантажних танків суден-газовозів

3. З урахуванням основних принципів системного підходу розроблено технологічну карту наукового дослідження.

РОЗДІЛ 3. АНАЛІЗ ФІЗИКО-ДИНАМІЧНИХ ПРОЦЕСІВ, ЩО ВІДБУВАЮТЬСЯ ПІД ЧАС ІНЕРТИЗАЦІЇ ВАНТАЖНИХ ТАНКІВ СУДЕН-ГАЗОВОЗІВ

Третій розділ дисертаційного дослідження присвячено розв'язанню першого допоміжного завдання, яким є визначення якісного та кількісного показників процесу інертизації вантажних танків суден-газовозів.

Основні результати розділу наведені в джерелах [44], [45], [60], [67], [73], [80], [87], [157].

3.1. Класифікація та призначення систем інертних газів суден-газовозів

Під час класифікування сучасних СІГ варто мати на увазі, що єдиний підхід до їхнього проектування відсутній. Однак певна спільність схем і конструктивних рішень систем інертних газів дозволяє класифікувати у спосіб, що наведений на рис. 3.1.

Системи інертних газів класифікуються за наступними ознаками:

- за методом отримання (генерації) інертних газів (випускних від судових дизелів або димових від судових котлів та таких, що генеруються генераторами інертних газів);
- за способом установки обладнання (стаціонарні або пересувні генератори газів);
- за ступенем обробки інертних газів, що обумовлюється заданою їхньою кондицією (без додаткової обробки, з додатковим очищенням від домішок, осушення газів);
- за способом додаткової обробки газів (сорбція домішок, осушення за допомогою холодильних машин або сорбентами та ін.) [44, 45, 92, 94].

Власне спосіб додаткової обробки газів визначає конструкцію й комплектацію обладнання. Відповідно до такої класифікації можна виділити системи шести основних типів, загальне призначення яких – підтримка у вантажних приміщеннях заданих параметрів газового середовища на всіх стадіях експлуатації судна.

Тип А – системи з відбором інертних газів від димоходів головних або допоміжних дизелів, а також головних або допоміжних котлів та наступним очищенням і охолодженням газів у контактних апаратах (скруберах) за допомогою забортної води. Це найбільш прості так звані стандартні системи інертних газів, що отримали найбільше поширення на суднах. Системи виконані із широким діапазоном продуктивності від 5000 до 50000 м³/год інертних газів і призначені для установки на танкерах та суднах-газовозах різного дедвейту, що мають як паротурбінні, також і дизельні енергетичні установки та використовуються для перевезень сирої нафти або зрідженого природного чи нафтового газу. Найбільше доцільно їхнє застосування на танкерах та суднах-газовозах дедвейтом понад 150000 тонн, що виконують 6...8 вантажних переходів протягом року.

Тип Б – системи цього типу відрізняються від стандартних систем типу А пристроями для додаткового очищення газів від окислів сірки, що вбудовуються звичайно в скрубери. Системи призначені для суден різного тоннажу, що перевозять нафтопродукти тих сортів, які схильні реагувати з утворення SO₂, та суден, у дизелях яких спалюються сірчисті палива. Їх також можливо застосовувати на танкерах і суднах-газовозах невеликого дедвейту (до 50000 тонн). Варто мати на увазі, що зі зростанням вимог до захисту довкілля від забруднення системи типу Б, що забезпечують відлив від скрубєрів за борт води з мінімальним рівнем кислоти (яка утворюється під час десульфуризації випускних газів) отримують широке поширення [112-114].

Системи типу В характеризуються тим, що в них на додаток до очищення та охолодження в контактних апаратах інертних газів, що відбираються від димоходів дизелів або котлів, виконується осушення газів

або за допомогою холодильних машин, або за допомогою твердих або рідких сорбентів. Низка компаній і фірм вважає, що ускладнення систем та підвищення їхньої вартості не виправдується додатковим зниженням швидкості сірчистої корозії, зокрема, за умови зменшення конденсації парів води на внутрішніх поверхнях вантажних приміщень. Застосування систем типу В доцільне на суднах, що перевозять гігроскопічні вибухо- і вогнебезпечні матеріали, наприклад, аміак, ацетилен та азотні сполуки.

Тип Г – системи з отриманням інертних газів від автономних газотурбінних установок, потужність яких використовується для привода електрогенераторів або нагнітачів газів. Це досить складні та дорогі системи, що вимагають досить кваліфікованого обслуговування. Застосування систем типу Г доцільне за значних витрат інертних газів (не менш 30000 м³/год), що зумовлює їхню установку на танкерах та суднах-газовозах дедвейтом 400000...500000 тонн.

Типи Д и Е – системи з отриманням інертних газів під час спалювання палива в спеціально призначених для цього камерах згоряння. У системах типу Д, так само, як і в стандартних системах типу А, гази обробляються (очищаються та охолоджуються) тільки забортною водою в контактних апаратах. У системах типу Е виконується додаткова обробка газів – осушення твердими або рідкими сорбентами, холодильними машинами та через стиснення газів. Іноді передбачається адсорбція одного з компонентів суміші – вуглекислого газу з метою отримання складу, близького до технічно чистого азоту. Устаткування систем типів Д и Е, продуктивність яких коливається в межах 50...4000 м³/год інертних газів, компонується звичайно в єдині агрегати. Стаціонарні агрегати, які можуть містити в собі обладнання для додаткової обробки газів (робота зі схеми систем типу Е), призначаються в основному для установки на газовозах і танкерах з метою створення нейтральних подушок над хімікатами і зрідженими газами, що транспортуються. Пересувні агрегати, що працюють за схемою систем типу Д, використовуються під час аварії суден [115].

3.2. Аналіз методів зміни атмосфери вантажних танків суден-газовозів

Відповідно до огляду літературних джерел із завдання забезпечення процесу інертизації вантажних танків суден-газовозів існує два основних методи зміни атмосфери танку – розведення та заміщення [60, 67].

Метод заміщення заснований на різниці густини газу, який знаходиться в танку, і газу, який подається в танк (рис. 3.2).

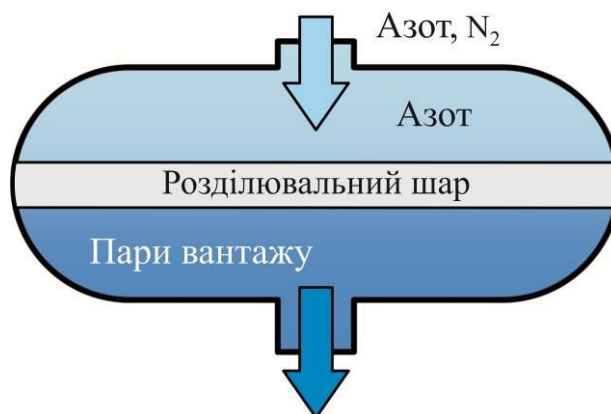


Рис. 3.2. Зміна атмосфери вантажного танку методом заміщення

Метод заміщення забезпечує чітке розділення шарів інертного газу (у розглянутому прикладі азоту) і більш важких парів вантажу. Однак разом з цим необхідно позбутися різких змін швидкості подачі інертного газу до вантажного танку, подавати інертний газ у верхню частину вантажного танку, уникати турбулентності потрапляння інертного газу в танк. Метод заміни вважається дуже ефективним у разі використання як інертного газу азоту. У зв'язку з тим, що густина більшості комерційних газів значно перевищує густина азоту, цей метод має широке застосування на суднах-газовозах. Використання методу розміщення атмосфери можна виконувати одночасно по всіх вантажних танках (якщо в цьому є необхідність).

Технологічні схеми, що забезпечують інертизацію вантажних танків, залежать від конструкційних особливостей суден-газовозів. До основних з них відносяться каскадна, напівкаскадна та паралельна [80].

Інертизація (продування) каскадом означає, що танки продуваються один за одним, атмосфера одного танка витісняється в інший танк і таким чином виконується заповнення всіх танків (рис. 3.3).

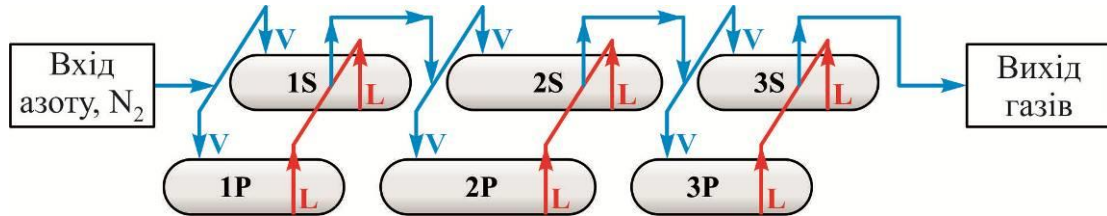


Рис. 3.3. Принципова схема, що забезпечує продування танків каскадом: S – вантажні танки правого борту (Starboard); P – вантажні танки лівого борту (Port Side); L – лінія рідини (Liquid line); V – лінія пари (Vapor line)

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

Дуже часто вантажна система судна не дозволяє з'єднати всі танки послідовно. У такому випадку можна використовувати так званий напівкаскадний метод продування. Зазвичай вантажна система газоза розділена на дві окремі групи, що дозволяє проводити продування каскадом однієї групи танків послідовно, а другої групи в паралель (рис. 3.4).

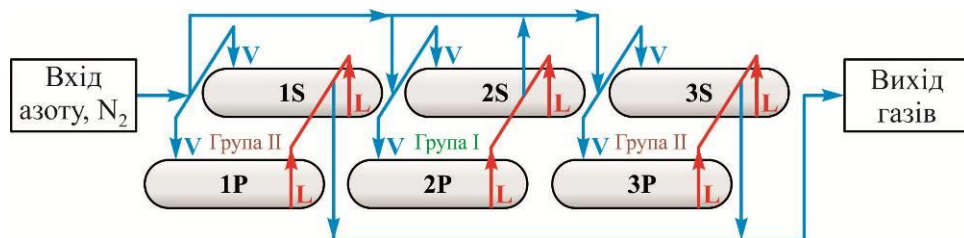


Рис. 3.4. Принципова схема, що забезпечує продування танків напівкаскадом:

S – вантажні танки правого борту (Starboard); P – вантажні танки лівого борту (Port Side); L – лінія рідини (Liquid line); V – лінія пари (Vapor line)

На схемі, що надана на рис. 3.4, перша система містить танки 2 лівого та 2 правого борту (2S та 2P) в одній групі I, друга система – танки 1 лівого та 1 правого борту (1S та 1P), а також танки 3 лівого та 3 правого борту (3S та 3P) в іншій групі II. Групи I та II включені у систему паралельно, але танки групи II продуваються каскадом.

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

Якщо немає можливості з'єднати танки послідовно, тоді продування виконується паралельно, при цьому схема набуває вигляду, представленого на рис. 3.5.

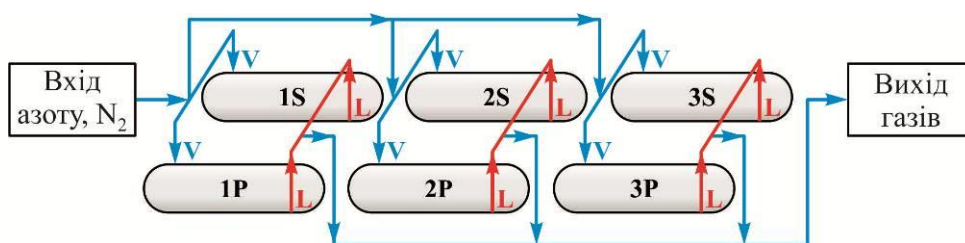


Рис. 3.5. Принципова схема, що забезпечує продування танків у паралель:

S – вантажні танки правого борту (Starboard); P – вантажні танки лівого борту (Port Side); L – лінія рідини (Liquid line); V – лінія пари (Vapor line)

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

Азот також може використовуватися з метою розведення атмосфери вантажного танку. Ці цьому випадку подача азоту в танк проводиться з високою швидкістю, що сприяє рівномірному перемішуванню (розведенню) атмосфери танку з азотом (рис. 3.6).

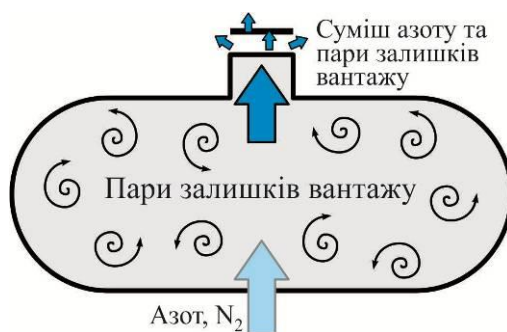


Рис. 3.6. Метод розведення атмосфери танка азотом

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

- азот повинен надходити в танк із температурою $+20^{\circ}\text{C} \dots +50^{\circ}\text{C}$;
- важчий газ завжди повинен надходити в танк зверху, легкий газ слід подавати на низ танка;
- продування слід починати з максимальною подачею азоту для забезпечення кращого перемішування атмосфери танка.

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

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

Продування вантажних танків також можливе шляхом використання пари вантажу, що є досить легкою операцією. Більшість парів, вантажів, що перевозяться, значно важчі азоту (за винятком аміаку та етилену). Тому виглядає очевидним подавати важкі пари вантажу на низ танка. Для суден середньої вантажомісткості (до 15000 м^3) продування парами вантажу доцільніше проводити в паралель (рис. 3.7), тому що для продування судна такої місткості використання каскадної схеми продування призведе до значних тимчасових втрат, тому що після продування систему необхідно буде налаштувати на паралельне навантаження.

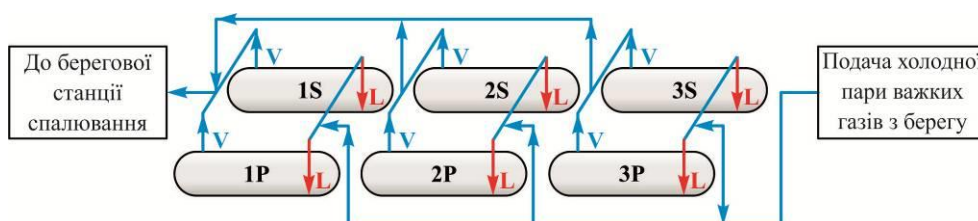


Рис. 3.7. Принципова схема, що забезпечує продування танків у паралель холодною парою важких вантажів:

S – вантажні танки правого борту (Starboard); P – вантажні танки лівого борту (Port Side); L – лінія рідини (Liquid line); V – лінія пари (Vapor line)

Продування в паралель також дозволяє за значної інтенсивності подачі парів у танки утримувати мінімальний тиск усередині танків, чим досягається найбільш повне використання ефекту витиснення.

Під час продування танків парами легких газів використовують схему, що наведена на рис. 3.8.

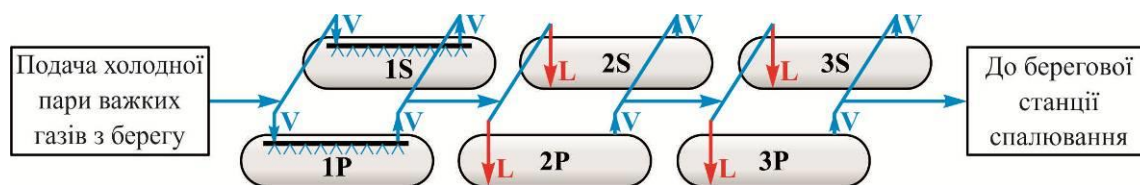


Рис. 3.8. Принципова схема, що забезпечує продування танків каскадом холодною парою легких вантажів:

S – вантажні танки правого борту (Starboard); P – вантажні танки лівого борту (Port Side); L – лінія рідини (Liquid line); V – лінія пари (Vapor line)

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

Цей метод можна оптимізувати, коли концентрація парів етилену в першому танку досягне 100 %. Після цього можна починати подачу етилену в зрідженому вигляді на верхній розпил танка. Інтенсивність подачі рідкого етилену повинна бути незначною, щоб забезпечити повне випаровування вантажу всередині танка та його поступове охолодження. Водночас система повинна бути перебудована таким чином, щоб холодні пари етилену подавалися за схемою «знизу вгору». Після досягнення 100 %-ої концентрації парів етилену в наступному танку також починається подача рідкого вантажу на верхній розпил цього танка і проводиться його охолодження (рис. 3.7).

Оскільки продування танків парами здійснюється одночасно з їх охолодженням, така операція дозволяє значно заощадити час. Якщо береговий термінал може подавати в суднову систему тільки рідкий вантаж, то для отримання гарячої пари можна використовувати палубний підігрівач.

Продування танків парами зрідженого газу зазвичай проводиться у суднових умовах з використанням вантажу з дек-танку. Цей вантаж називається охолодний агент (рис. 3.9).

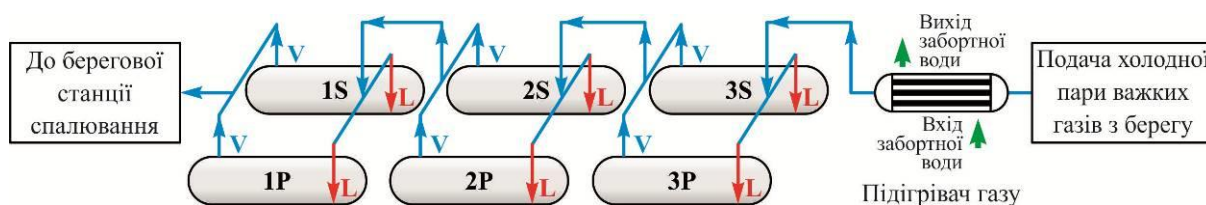


Рис. 3.9. Продування танків каскадом з використанням гарячої пари рідкого вантажу:

S – вантажні танки правого борту (Starboard); P – вантажні танки лівого борту (Port Side); L – лінія рідини (Liquid line); V – лінія пари (Vapor line)

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

3.3. Аналіз термодинамічних явищ, що відбуваються під час транспортування зріджених природних газів

Транспортування ЗПГ суднами-газовозами супроводжується постійними тепловими та масовими перетвореннями, що відбуваються із зовнішньої та внутрішньої сторони вантажних приміщень. Спрощена модель ізолюваного вантажного приміщення, яке заповнено ЗПГ, надана на рис. 3.10.

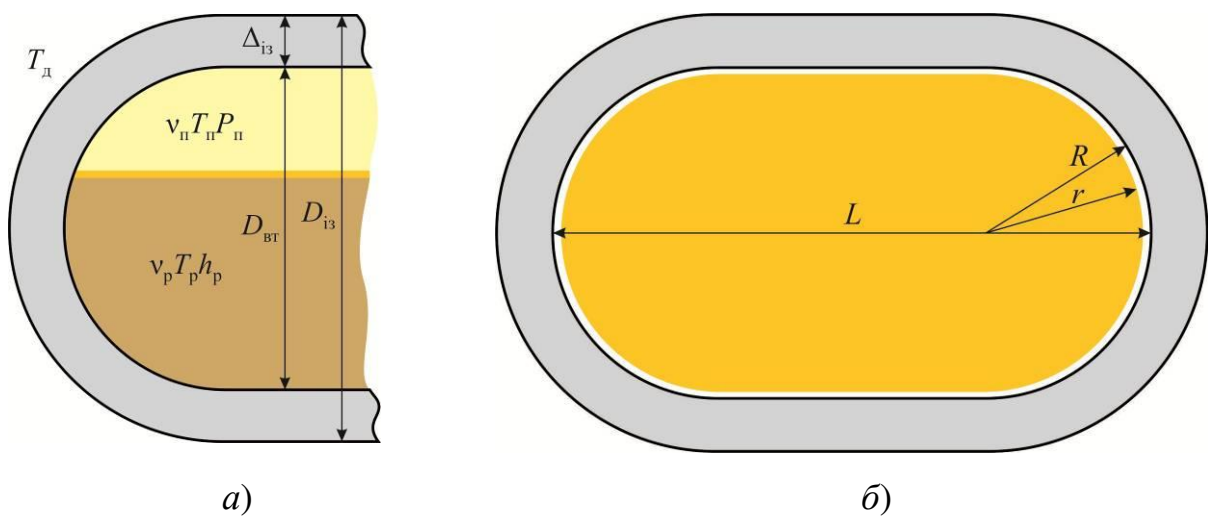


Рис. 3.10. Фізична модель вантажного танка судна-газовозу:

a – вертикальний переріз; *б* – горизонтальний переріз

Перенесення теплоти від навколишнього середовища до ЗПГ здійснюється через циліндричну частину ємності, а його інтенсивність визначається завтовшки теплоізолюючого шару $\Delta_{\text{із}}$. Деяке значення мають температура довкілля $T_{\text{д}}$ та зовнішній діаметр ізоляційного простору $D_{\text{із}}$, за якими обчислюється інтенсивність конвективного підведення теплоти до поверхні криогенного резервуара. Із внутрішньої сторони теплоізоляційний простір обмежений стінкою вантажного танка діаметром $D_{\text{вт}}$, яка має достатню товщину, тому має задовільну температуропровідність і виконує функцію екрана, який формує внутрішню ізоtermічну межу теплового огороження [116, 117].

Щоб уникнути аварійних ситуацій під час заповнення вантажного танка, завжди залишають деякий вільний простір для накопичення пари, що утворюється в результаті підведення теплоти з зовнішнього контуру. Цей простір визначається висотою h_p вантажу (рідини), що знаходиться у вантажному танку.

Процеси, які відбуваються у вантажному танку судна-газовоза, з достатньою точністю можуть бути проаналізовані за допомогою одновимірної моделі, тобто всі теплові потоки відносяться до одиниці обсягу внутрішнього простору вантажного танка. При цьому необхідно визначити питомі характеристики вантажного танка, такі як:

питома маса ЗПГ (маса рідкої фази) g_p ;

питома маса парів ЗПГ g_{Π} ;

питомий простір, зайнятий рідиною v_p ;

питомий паровий простір v_{Π} :

$$g_p = \frac{G_p}{V_{\text{вт}}}, g_{\Pi} = \frac{G_{\Pi}}{V_{\text{вт}}}, v_p = \frac{V_p}{V_{\text{вт}}}, v_{\Pi} = \frac{V_{\Pi}}{V_{\text{вт}}};$$

де G_p – вага рідини; G_{Π} – вага пари; V_p – об'єм рідини; V_{Π} – об'єм пари; $V_{\text{вт}}$ – об'єм вантажного танка.

За визначенням сума питомого простору, зайнятого парою та рідиною, дорівнює 1 м^3 , що дозволяє вираховувати за відомою величиною питомого простору, зайнятого рідиною, залишковий простір, зайнятий парою

$$v_p + v_{\Pi} = 1 \rightarrow v_{\Pi} = 1 - v_p.$$

Визначальне значення під час моделювання процесів тепломасоперенесення всередині вантажного танка має густина фаз ЗПГ. Густина рідини ρ_p є функцією її температури, оскільки рідина перебуває у насиченому стані. Підвищення температури рідини T_p призводить до зниження її густини – $\rho_p = f(T_p)$.

Об'єм, зайнятий рідиною, визначається за відомим значенням питомої маси:

$$v_p = g_p / \rho_p.$$

Визначально на темп випаровування рідини у вантажному танку впливає тривалість транспортування та величина теплопритоків із зовнішнього контуру q_d :

$$g_p = f(\tau, q_d).$$

Теплопритоки з довкілля є функцією цілого ряду показників:

$$q_d = f(D_{\text{вт}}, \Delta_{\text{із}}, \lambda_{\text{із}}, T_d);$$

де $\lambda_{\text{із}}$ – теплопровідність ізоляції, Вт/(м·К).

Загалом під час транспортування ЗПГ суднами-газовозами зміна температури довкілля відбувається з плавної експоненті або мало змінюється. Значення діаметра вантажного танка є постійною величиною, такою, яка не має лінійних розширень, викликаних зміною зовнішньої і внутрішньої температури [118, 119]. Також практично незмінною є теплопровідність теплоізолюючого шару, хоча в загальному випадку вона залежить від розподілу температур усередині ізоляції:

$$T_d \approx \text{const}; D_{\text{вт}} = \text{const}; \lambda_{\text{із}} \approx \text{const} \rightarrow q_d = f(\Delta_{\text{із}}).$$

Таким чином, величина теплопритоків із зовнішнього контуру в основному залежатиме від вибору товщини теплоізолюючого шару.

Тиск парів вантажу P_v , що у вантажному танку, є функцією кількох чинників. При цьому визначальними є:

час транспортування τ ;

величина теплопритоків із зовнішнього контуру (якість теплоізоляції);

початковий питомий об'єм парового простору:

$$P_{\text{в}} = f(\tau, q_{\text{д}}, v_{\text{п}}^0);$$

де $v_{\text{п}}^0$ – питомий об'єм парового простору, $\text{м}^3/\text{м}^3$

Кількість парів, що утворюються, у загальному випадку визначається інтенсивністю теплопритоків і теплотою пароутворення r , що визначається виразом:

$$\Delta g_{\text{р}} = g_{\text{д}}/r.$$

Величина теплоти пароутворення залежить від поточного тиску в системі та тиску пари: $r=f(P_{\text{п}})$. Підвищення тиску пар супроводжується зростанням температури насиченої рідини: $T_{\text{р}}=f(P_{\text{п}})$.

Для визначення масових перетворень необхідно розраховувати тиск пари для кожного моменту часу. У початковий час тиск парів дорівнює атмосферному, а обчислення поточного значення виконується за розрахунковим значенням щільності пари. Густина пари може бути обчислена за відомим значенням питомої маси та питомого об'єму парів:

$$\rho_{\text{п}} = g_{\text{п}}/v_{\text{п}}.$$

Описаний комплекс фізичних процесів зумовлює поступову зміну стану замкнутої системи і, зрештою, призводить до критичного підвищення тиску.

Основу математичної моделі вантажного танка становить рівняння енергії для рідкої та парової фракцій. З урахуванням прийнятих обмежень необхідно описати процеси, які відбуваються в одиниці об'єму вантажного танка. При цьому ентальпія всередині цього об'єму є функцією від внутрішніх джерел q_v та теплоти, що підводиться в цей елементарний об'єм по трьох осях q_x , q_y і q_z

$$\rho_{\text{р}} \frac{dh_{\text{р}}}{d\tau} = \frac{dq_x}{dx} + \frac{dq_y}{dy} + \frac{dq_z}{dz} + q_v.$$

Враховуючи, що транспортування ЗПГ є бездренажним, тобто

$$\frac{dq_x}{dx} + \frac{dq_y}{dy} + \frac{dq_z}{dz} = 0,$$

розподілені джерела теплоти складаються з теплопритоку через теплову ізоляцію q_d і теплоти, що поглинається під час випаровуванні рідини:

$$q_v = q_d + \frac{dg_p}{d\tau}.$$

Застосуємо метод заміни змінних та отримаємо спрощений запис рівняння:

$$\rho_p \frac{\Delta h_p}{d\tau} = q_v.$$

Звідси маємо вираз, придатний для обчислення ентальпії рідини на новому часовому шарі:

$$h'_p = h_p + \frac{q_v \Delta \tau}{\rho_p}.$$

Після того, як буде обчислено нове значення ентальпії рідини на новому часовому шарі, може скластися одна з трьох можливих ситуацій:

1) ентальпія рідини на новому часовому шарі більше, ніж ентальпія насиченої рідини (рідина перегріта) – у цьому випадку ініціалізується процес пароутворення: $h'_p > h'$, $\Delta q_p = 0$, $h' = f(P_p)$;

2) ентальпія рідини дорівнює ентальпії насиченої рідини під час поточного тиску (немає пароутворення): $h'_p = h'$, $\Delta q_p = 0$, $h' = f(P_p)$;

3) ентальпія рідини менша від ентальпії насиченої рідини під час поточного тиску – у цьому режимі також не відбувається пароутворення, оскільки рідина знаходиться в недогрітому стані: $h'_p < h'$, $\Delta q_p = 0$, $h' = f(P_p)$.

У випадках, коли нове значення ентальпії рідини виявляється вище ентальпії насиченої рідини, виконується розрахунок втрат рідини з допомоги випаровування. Кількість втраченої рідини обчислюється з урахуванням питомої маси рідини та відношення до різниці ентальпій насиченої рідини, віднесеної до теплоти пароутворення рідкого ЗПГ за даним тиском:

$$\Delta g_p = g_p \frac{(h'_p - h_p)}{h'' - h'},$$

де h'' – тиск насиченої пари при поточному значенні тиску пари, $h''=f(P_{\pi})$.

Після того, як будуть визначені втрати рідини від випаровування, можна визначити масу рідини на новому тимчасовому шарі:

$$g'_p > g_p - \Delta g'_p.$$

За відомою густиною рідкої фракції $\rho_p=f(P_{\pi})$ розраховується на новому часовому шарі: питомий об'єм, займаний рідиною $v_p > g'_p/\rho_p$ та об'єм, який займатиме пара $v_{\pi} > 1 - g'_p$.

Розрахункове значення втрат рідини від випаровування дозволяє визначити кількість пари, яка перебуватиме в паровому просторі на новому часовому шарі:

$$g'_{\pi} = g_{\pi} + \Delta g.$$

За масою пари розраховується густина пари на новому часовому шарі:

$$\rho'_{\pi} = \frac{g'_{\pi}}{v_{\pi}}.$$

Для розрахунку зміни ентальпії парів використовується рівняння енергії парової фракції:

$$\rho'_{\pi} \frac{\partial h_{\pi}}{\partial \tau} = \frac{\partial q_y}{\partial y} + q_v.$$

Рівняння енергії парової фракції розраховує зміну ентальпії парів з урахуванням підведення теплоти з навколишнього середовища та кількість теплоти, перенесену з парами рідкої фракції, що проникають у паровий простір [120]. Використовуючи метод заміни похідних кінцевими різницями, перетворюємо рівняння до виду:

$$\rho_{\text{п}} \frac{h_{\text{п}}}{\Delta\tau} \approx \frac{\Delta q_y}{\Delta y} + q_v,$$

де Δq_y – кількість теплоти, внесена насиченими парами до парового простору: $\Delta q_y = \Delta g(h'' - h_{\text{п}})$.

Велика товщина стінки та висока якість контакту між рідкою фракцією та стінкою призводить до того, що стінка танка виконує функції екрана, тобто рідина відводить від нього всі теплопритоки, які проникають крізь ізоляцію. У зв'язку з цим для парової фази приймається, що теплота від внутрішніх джерел дорівнює нулю оскільки немає теплопритоків з довкілля: $q_v = q_d = 0$ [121, 122].

Таким чином:

1) транспортування зрідженого природного газу у вантажних танках з газозаповненою ізоляцією технічно можливе, і при виборі достатньої товщини ізоляції може забезпечити задовільні логістичні результати;

2) під час бездренажного транспортування немає втрат енергоносія зрідженого природного газу, оскільки всі пари, що утворилися, акумулюються в паровому просторі і можуть бути використані у вигляді палива;

3) наростання тиску насичення рідини в процесі транспортування створює додаткові технічні проблеми під час організації розвантаження, оскільки рідина, яка до моменту завершення транспортування перебуває в стані насичення за високим тиском, під час перекачування в приймальну ємність з меншим тиском частково переходить в паровий стан, що вимагатиме додаткових заходів для утилізації великої кількості парів ЗПГ.

3.4. Аналітичне визначення процесів конвективної дифузії в газах

Завантаження, транспортування, розвантаження зріджених газів, а також технологічні процеси з дегазації та інертизації вантажних танків суден-газовозів пов'язані з явищем конвективної дифузії, що виникає на межі розподілу рідина (зріджений газ) – газ (пара, що утворилась під час транспортування ЗПГ), а також безпосередньо у внутрішньому об'ємі газу (що знаходиться у верхній частині вантажного танку) та внутрішньому об'ємі вантажу (рідини або її парів) [73, 87].

Питання щодо моделювання подібних хімічних перетворень неодноразово обговорювалося науковою спільнотою, але остаточного та однозначного рішення в цьому питанні не досягнуто.

Розглянемо передусім з урахуванням теорії подібності реакції, що перебігають відповідно до законів дифузійної кінетики, тобто питання щодо моделювання процесу конвективної дифузії. При цьому для виключення другорядних факторів та спрощення математичних виразів будемо враховувати лише стаціонарний режим течії та процесу дифузії. Як масштаб вимірювання концентрації речовини в газі або в парах вантажу візьмемо величину концентрації далеко від поверхні розділювального шару c_0 . Тоді рівняння гідродинамічного та дифузійного розділювального шару можуть бути написані у безрозмірному вигляді:

$$V_x \frac{\partial V_x}{\partial X} + V_y \frac{\partial V_x}{\partial Y} = -\frac{\partial P}{\partial X} + \frac{1}{\text{Re}} \frac{\partial^2 V_x}{\partial X^2}; \quad (3.1)$$

$$V_x \frac{\partial C}{\partial X} + V_y \frac{\partial C}{\partial Y} = \frac{1}{\text{Pe}} \frac{\partial^2 C}{\partial Y^2}. \quad (3.2)$$

Граничні умови мають вигляд

$$\begin{aligned}
V_x &\rightarrow 1, & \text{якщо } Y &\rightarrow \infty, \\
V_x = V_y &= 0, & \text{якщо } Y &= 0, \\
C &\rightarrow 1, & \text{якщо } Y &\rightarrow \infty, \\
C &= 0, & \text{якщо } Y &= 0
\end{aligned}$$

У рівняння (3.1) і (3.2) входять два визначальні критерії: Рейнольдса Re та Пекле Pe ; решта безрозмірних величин є їх функціями.

Замість Pe можна ввести критерій Прандтля Pr :

$$Pr = \frac{Pe}{Re} = \frac{\nu}{D}.$$

У дифузійних задачах основний інтерес представляє дифузійний потік j_{π} речовини з одиниці поверхні. Його також зручно ввести як безрозмірний критерій, визначивши дифузійний критерій Нуссельта Nu співвідношенням

$$j_{\pi} = \frac{Dc_0}{l} Nu;$$

тобто

$$Nu = \frac{l}{Dc_0} j_{\pi}. \quad (3.3)$$

Критерій Нуссельта пов'язаний із наочною величиною – товщиною дифузійного розділювального шару – співвідношенням

$$Nu = \frac{l}{\delta}.$$

Потрібно ще мати на увазі, що слід розрізняти локальні та середні значення критерію Нуссельта Nu , оскільки j_{π} залежить від точки, взятої на поверхні розділювального шару; у різних точках розділювального шару може бути різне значення локального критерію Nu , визначеного формулою (3.3).

На заміну локального критерію Нуссельта можна ввести середній критерій Нуссельта, визначений за допомогою співвідношення

$$\overline{\text{Nu}} = \frac{I_{\text{пр}} l}{D c_0 S},$$

де $I_{\text{пр}} = \int j_{\text{пр}} dS$; S – поверхня реакції, та

$$\overline{\text{Nu}} = \psi(\text{Re}, \text{Pr}).$$

Перейдемо тепер до питання щодо безрозмірних параметрів, що характеризують гетерогенну хімічну реакцію, яка перебігає біля поверхні розділювального шару [123, 124].

Розглянемо випадок реакції першого порядку. Тоді маємо нове рівняння граничних умов

$$D \left(\frac{\partial c}{\partial y} \right) = k c_1 \quad \text{якщо } y=0 \quad (3.4)$$

Величини, що входять до граничної умови (3.4), не є незалежними, і значення їх визначається інтегруванням рівнянь руху.

У разі переходу до безрозмірних величин слід пам'ятати, що

$$\frac{\partial c}{\partial y} \approx \frac{c_0}{\delta}.$$

Тому для переходу до безрозмірних величин умову (3.4) слід сформулювати як

$$D \left(\frac{\partial c}{\partial y} \right)_{y=0} = \frac{D}{l} \frac{l}{\delta} \left(\frac{\partial C}{\partial Y} \right)_{Y=0} c_0.$$

Тоді

$$\frac{\partial C}{\partial Y} = \lambda C \quad \text{якщо } Y=0.$$

Де безрозмірний параметр λ дорівнює

$$\lambda = \frac{kl}{D} \frac{\delta}{l} = \frac{kl}{D} f(\text{Re}, \text{Pr})$$

Параметр λ є визначальним безрозмірним критерієм та може бути різним на різних точках поверхні поділу рідина – газ. Він представляє відношення швидкостей процесу хімічного перетворення (кількості частинок, що реагують в 1 с за $c_0=1$) до швидкості процесу дифузії через розділювальний шар δ (кількість частинок, що наближаються за 1 с до 1 см² поверхні, коли концентрація $c_0=1$).

Безрозмірна швидкість гетерогенного процесу на одиницю поверхні:

$$\text{Nu} = \Phi(\text{Re}, \text{Pr}, \lambda). \quad (3.5)$$

Зазначимо, що функція Φ не збігається з $\phi(\text{Re}, \text{Pr})$, що входить у вираз для числа Нуссельта в умовах суто дифузійної кінетики. За умовою визначених значень Re і Pr вона може бути різною, якщо критерій має різні значення [125].

Граничну умову (3.4) можна сформулювати як

$$\left(\frac{\partial C}{\partial Y} \right)_{Y=0} = \gamma C^m.$$

де безрозмірний критерій γ дорівнює

$$\gamma = \frac{kl}{D} \frac{\delta}{l} c_0^{m-1} = \frac{klc_0^{m-1}}{D} f(\text{Re}, \text{Pr})$$

Для безрозмірної швидкості реакції маємо:

$$\text{Nu} = \Phi(\text{Re}, \text{Pr}, \gamma).$$

Процеси конвективної дифузії відбуваються не лише на межі розподілу газ – рідина, але також безпосередньо всередині газового середовища, яке (щодо транспортування ЗПГ у вантажних танках суден-газовозів) знаходиться над поверхнею рідини та під час забезпечення процесу інертизації створює тиск на рідку або газоподібну фазу вантажу, що залишився у вантажному танку.

Якісне виконання процесу інертизації за умовою забезпечення цього процесу методом заміщення атмосфери танка (див. пп. 1.3.2, рис. 1.5, 1,8) можливе лише за умови підтримання ламінарного потоку газів, що потрапляють до вантажного танка [126, 127].

За звичайних умов ламінарність режиму дотримується у випадку, коли значення числа Рейнольдс не перевищують 2500. У цьому випадку весь потік газів, що потрапляє до вантажного танка може бути розглянутим таким, що складається з двох частин: так званої вхідної ділянки та ділянки пуазейлівської течії. У вхідній ділянці газ, що надходить до вантажного танка, підпадає під вплив дії стінок, що викликає зменшення його швидкості. Під впливом цієї гальмівної дії початковий прямолінійний профіль швидкостей поступово перетворюється на пуазейлівський.

Виходячи з загальних міркувань про подібність між дифузією та поверхневим тертям, можна стверджувати, що у випадку дифузії до стінок вантажного танку, що є поверхнею реакції, також існують вхідна ділянка і ділянка розподілу речовини. Оскільки коефіцієнт дифузії в рідині малий порівняно з в'язкістю, очікується, що ділянка, на якій встановлюється розподіл дифузної речовини, значно довша, ніж вхідна ділянка для

встановлення пуазейлівського профілю швидкостей. Тоді весь об'єм вантажного танку можна розбити на три ділянки: газодинамічна вхідна ділянка довжиною h , дифузійна вхідна ділянка H і ділянка сталих режимів.

У першій ділянці перебігає лише безпосередньо дифузія газу, що потрапляє до вантажного танка. Пари вантажу, що залишився в танку та на які спрямована дія газу, що потрапляє до танка, не впливають на зміну швидкості та концентрації газу.

У другій ділянці формування пуазейлівського профілю швидкості виявляється закінченим, і подальший плин газу відбувається з параболічним профілем швидкості, що характеризується формулою

$$v = v_0 \left(1 - \frac{r^2}{R^2} \right),$$

де $v_0 = \frac{R^2 \Delta p}{4\mu L}$ – максимальна швидкість газу, що потрапляє у вантажний танк;

Δp – перепад тиску на довжині L .

З огляду на вкрай малу товщину розподільного шару процес дифузії відбувається на малих відстанях від стінки, при $r \approx R$. Тому, вводячи нову змінну

$$y = R - r,$$

можна обмежитися малими значеннями змінної y ($y \ll R$). Тоді

$$v \approx v_0 \frac{2y}{R},$$

Рівняння конвективної дифузії матиме вигляд

$$\frac{2v_0}{R} y \frac{\partial c}{\partial x} = D \frac{\partial^2 c}{\partial y^2}. \quad (3.6)$$

де x – координата, спрямована вздовж вантажного танка.

Проведемо обчислення лише граничного дифузійного потоку, тож граничні умови матимуть вигляд

$$\begin{aligned} c &\rightarrow c_0 && \text{якщо } y \rightarrow \infty, \\ c &= 0 && \text{якщо } y = 0. \end{aligned} \quad (3.7)$$

Розв'яжемо рівняння (3.6), вводячи безрозмірну величину

$$\eta = \left(\frac{v_0}{DR} \right)^{1/3} \frac{y}{x^{1/3}};$$

Тоді маємо для концентрації $c(\eta)$

$$\frac{d^2 c}{d\eta^2} + \frac{2}{3} \eta^2 \frac{dc}{d\eta} = 0.$$

Рішенням останнього рівняння, що задовольняє граничні умови (3.7), служить вираз

$$c = \frac{c_0 \int_0^{\frac{y}{x^{1/3}} \left(\frac{v_0}{DR} \right)^{1/3}} \exp \left\{ -\frac{2}{9} \eta^3 \right\} d\eta}{\int_0^\infty \exp \left\{ -\frac{2}{9} \eta^3 \right\} d\eta}.$$

Густина дифузійного потоку характеризується формулою

$$\begin{aligned} j_{\text{дифф}} &= D \left(\frac{\partial c}{\partial y} \right)_{y=0} = \frac{Dc_0}{x^{1/3}} \left(\frac{v_0}{DR} \right)^{1/3} \frac{1}{\int_0^\infty \exp \left\{ -\frac{2}{9} \eta^3 \right\} d\eta} = \\ &= \frac{Dc_0}{x^{1/3}} \left(\frac{v_0}{DR} \right)^{1/3} \frac{\sqrt[3]{0,23}}{0,89} = 0,67 c_0 D \left(\frac{v_0}{DRx} \right)^{1/3} = \frac{Dc_0}{\delta} \end{aligned} \quad (3.8)$$

де товщина розділювального шару δ визначається наступною рівністю:

$$\delta = \frac{1}{0,67} \left(\frac{D}{v} \right)^{1/3} \sqrt[3]{\frac{v}{v_0 R}} \sqrt[3]{R^2 x}. \quad (3.9)$$

Дифузійний потік всередині вантажного танку (у ділянці встановлення дифузійного режиму) може бути описаний формулою

$$I_{\text{дифф}} = 2\pi R \int j_{\text{дифф}} dx = 2\pi c_0 D \left(\frac{v_0 x^2}{DR} \right)^{1/3} R. \quad (3.10)$$

Особливістю формул (3.8)-(3.10) є те, що в них не входить коефіцієнт в'язкості рідини (від якої при цьому $\frac{\Delta p}{L}$ залежить тільки v_0). Це пов'язано з тим, що товщина дифузійного розділювального шару надзвичайно мала в порівнянні з товщиною гідродинамічного розділювального шару [128, 129].

На практиці величині H/R зазвичай настільки велика, що у всьому об'єму газів, що знаходиться над поверхнею залишків вантажу, не відбувається встановлення стаціонарного дифузійного режиму. У ньому утворюється постійний ламінарний рух газу, у тому числі у випадку сталого тиску з боку газів на поверхню залишків вантажу.

Розглянемо також явище релаксації дифузійного процесу за умов дифузії в ламінарному потоку газу, що потрапляє до вантажного танка. Припустимо, що відбувається процес сумішутворення між газом, що потрапляє до танка та парів залишків вантажу, причому кількість парів залишків вантажу обмежена.

Після деякого проміжку часу пари залишків вантажу повністю потрапляють в об'єм газу, з часом ця суміш поступово пересувається до розділювального шару. Розглянемо випадок розподілу швидкостей, що встановився, та розподілу концентрації, що не встановився. Проте граничними умовами в цьому випадку є

$$c=0 \text{ під час } x \leq h, \quad (3.11)$$

$$c=c_0 \text{ під час } x>h. \quad (3.12)$$

Скориставшись інваріантністю рівняння дифузії відносно до перетворення $x \rightarrow x + \text{const}$, запишемо розподіл концентрації, що відповідає граничним умовам (3.11), (3.12), у вигляді

$$c = c_0 - \frac{c_0 \int_0^{\left(\frac{v_0}{DR}\right)^{1/3} \frac{1}{(x-h)^{1/3}}} \exp\left\{-\frac{2}{9}\eta^3\right\} d\eta}{\int_0^\infty \exp\left\{-\frac{2}{9}\eta^3\right\} d\eta}.$$

Густина потоку речовини, що розчиняється, дорівнює

$$j = -D \left(\frac{\partial c}{\partial y} \right)_{y=0} = 0,67 c_0 D \left(\frac{v_0}{DRx} \right)^{1/3} \frac{1}{(x-h)^{1/3}} \text{ якщо } x \geq h.$$

При цьому концентрація парів залишків вантажу в товщі газу постійно дорівнює нулю, також газ не збагачується порціями парів залишків вантажу, що випаровується з ділянок, що лежать ближче до межі розподілу газу та рідини [130, 131].

Розподіл концентрації парів рідини, що потрапляє до об'єму газу визначається балансом між перенесенням уздовж поверхні поділу молекулярною дифузиею та потоком газу.

Рівняння конвективної дифузії має вигляд

$$\frac{\partial c}{\partial t} + v_0(r) \frac{\partial c}{\partial x} = D \left(\frac{\partial^2 c}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial c}{\partial r} + \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} \right), \quad (3.13)$$

де x – координата, що відраховується вздовж поверхні поділу,

$v_0(r)$ – швидкість газу.

Надалі зручно провести обчислення у системі відліку, що рухається зі швидкістю U разом із потоком, де U – середня швидкість руху газу.

У цій системі, очевидно,

$$v(r) = v_0 - U = 2U \left(1 - \frac{r^2}{R^2} \right) - U = U \left(1 - 2 \frac{r^2}{R^2} \right),$$

Вважаючи, що зміна концентрації вздовж поверхні розділювального шару відбувається повільніше, ніж у радіальному напрямку, (3.13) можна

опустити член $\frac{\partial^2 c}{\partial x^2}$.

Тоді маємо

$$\frac{\partial c}{\partial t} + U \left(1 - \frac{2r^2}{R^2} \right) \frac{\partial c}{\partial x} = D \left(\frac{\partial^2 c}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial c}{\partial r} \right), \quad (3.14)$$

де похідна по t береться в системі відліку, що рухається.

Граничною умовою на поверхні поділу є вимога

$$\left(\frac{\partial c}{\partial r} \right)_{r=R} = 0,$$

що виражає відсутність потоку рідини до газу.

На поверхні поділу концентрація повинна мати кінцеве значення [132, 133]. Припустимо, що градієнт концентрації вздовж поверхні поділу в першому наближенні постійний:

$$\left(\frac{\partial \bar{c}}{\partial x} \right) = \text{const.}$$

Тоді рішення рівняння (3.14) може бути написане у вигляді

$$\begin{cases} c = c_0 + \frac{UR^2}{4D} \frac{\partial \bar{c}}{\partial x} \left(\frac{r^2}{R^2} - \frac{1}{2} \frac{r^4}{R^4} \right), \\ \frac{\partial c}{\partial t} = 0, \end{cases}$$

де c_0 – концентрація на поверхні поділу якщо $r=0$, а

$$\bar{c} = 2 \int_0^R \frac{c r dr}{R^2} = \frac{2\pi \int_0^R c r dr}{S}$$

є середня концентрація по перерізу вантажного танка.

Звідси знаходимо:

$$\begin{cases} c = \bar{c} + \frac{R^2 U}{4D} \frac{\partial \bar{c}}{\partial x} \left(-\frac{1}{3} + \frac{r^2}{R^2} - \frac{1}{2} \frac{r^4}{R^4} \right), \\ \frac{\partial c}{\partial t} = 0. \end{cases}$$

Потік речовини по всій поверхні розділювального шару дорівнює

$$Q = 2\pi \int_0^R c v r dr = -\pi R^2 \left(\frac{R^2 \cdot U^2}{48D} \right) \frac{\partial \bar{c}}{\partial x}$$

Густина потоку

$$j = \frac{Q}{\pi R^2} = - \left(\frac{R^2 \cdot U^2}{48D} \right) \frac{\partial \bar{c}}{\partial x}$$

має такий самий вигляд, як густина дифузійного потоку під час градієнту концентрації $\frac{\partial \bar{c}}{\partial x}$ та ефективного коефіцієнту дифузії

$$D_{\text{еф}} = \frac{R^2 U^2}{48D}. \quad (3.15)$$

У наступному наближенні, вважаючи, що $\frac{\partial \bar{c}}{\partial x} \neq \text{const}$ можна написати:

$$\frac{\partial \bar{c}}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial x} j,$$

або

$$\frac{\partial \bar{c}}{\partial t} = D_{\text{еф}} \frac{\partial^2 \bar{c}}{\partial x^2}. \quad (3.16)$$

Формула (3.16) показує, що в межах зроблених наближень розподіл середньої концентрації в системі відліку, що рухається з середньою швидкістю, виражається дифузійним рівнянням для нерухомого середовища з ефективним коефіцієнтом дифузії (3.15) [134, 135].

Оцінімо умови, у яких виконуються зроблені наближення. Щоб поздовжньою молекулярною дифузією можна було нехтувати проти конвективної, необхідне виконання нерівності

$$D \ll D_{\text{еф}}. \quad (3.17)$$

Умовою того, що c можна вважати функцією координати x , що повільно змінюється (так що в першому наближенні $\frac{\partial c}{\partial x} \approx \text{const}$), є рівність

$$\frac{\partial c}{\partial x} = \frac{\partial \bar{c}}{\partial x} + \frac{R^2 U}{4D} \frac{\partial^2 \bar{c}}{\partial x^2} \left(-\frac{1}{3} + \frac{r^2}{R^2} - \frac{1}{2} \frac{r^4}{R^4} \right) \approx \frac{\partial \bar{c}}{\partial x}.$$

Тоді

$$\frac{\partial \bar{c}}{\partial x} > \frac{R^2 U}{4D} \frac{\partial^2 \bar{c}}{\partial x^2}.$$

Якщо L – довжина поверхні поділу, на якій відбувається помітна зміна \bar{c} , то останню нерівність можна записати у вигляді

$$\frac{LD}{R^2U} > 1. \quad (3.18)$$

Нерівності (3.17) і (3.18) дають границі застосування рівняння (3.16) [136-138].

Як приклад його використання можна розглянути таке.

Деяку кількість рідкої речовини N введено в потік газу в момент $t=0$ на початку координат $x=0$, яке знаходиться на поверхні поділу, тобто

$$c = \frac{N}{\pi R^2} \delta(x) \text{ якщо } t=0 \quad (3.19)$$

Розподіл концентрації вздовж розділювального шару за будь-який час (тобто за умови $t>0$) визначається рішенням рівняння (3.16) з початковою умовою (3.19)

$$c = \frac{1}{2} \frac{N}{\pi R^2} \frac{1}{\sqrt{\pi D_{\text{еф}} t}} e^{-\frac{(x-Ut)^2}{4D_{\text{еф}} t}}. \quad (3.20)$$

У формулу (3.20) входить одна невідома величина $D_{\text{еф}}$. Визначаючи під час досліджень розподіл концентрації в деякий момент часу t після введення речовини і порівнюючи його з (3.20), можна визначити значення $D_{\text{еф}}$. Останнє дозволяє накопичити швидкість потоку (якщо відоме значення D) чи коефіцієнт дифузії (якщо відома швидкість потоку U).

3.5. Експериментальні дослідження з оцінки якості проведення процесу інертизації вантажних танків суден-газовозів

3.5.1. Визначення критеріїв оцінки якості перебігу процесу інертизації

Як було визначено в п. 3.2, необхідною умовою якісного проведення процесу інертизації вантажних танків суден-газовозів є забезпечення стійкого шару, що розділяє пари вантажу, які залишилися в танку, та інертний газ, що в нього подається (див. рис. 3.2).

У випадку підтримання стійкого розділювального шару у вантажному танку забезпечується ефект «поршню», через який здійснюється поступове, але постійне витиснення залишків вантажу. Розрив поверхні розділювального шару сприяє потраплянню парів вантажу з нижньої частини танку до верхньої. При цьому над поверхнею розділювального шару здійснюється утворення суміші інертного газу та парів вантажу, концентрація яких у загальному об'ємі суміші постійно коливається [73, 139]. Це збільшує час інертизації вантажних танків та призводить до підвищення витрати інертного газу, а також (через збільшення витрати енергії на генерацію інертного газу) знижує енергетичну ефективність процесу інертизації. Підставою порушення суцільності розділювального шару у вантажному танку може стати підвищений тиск інертного газу, який подається в танк, або неякісний стан інертного газу. У разі використання азоту це може бути наявність в газі води, яка за низькою температурою перетворюється в лід та може розірвати поверхню розділювального шару. За умови використання діоксиду вуглецю суцільність поверхні розділювального шару може бути зруйнована через механічні домішки та тверді незгорілі частинки, що входять до складу випускних газів [140-142].

Прагнення прискорити вантажні операції та скоротити час стоянки судна змушує виконувати процес інертизації з максимально можливим для вантажної системи тиском інертного газу. При цьому саме максимально

можливий тиск інертного газу, що подається у вантажні танки, є єдиним показником, що вказується в нормативних документах, які регулюють виконання вантажних операцій. Одночасно з цим не існує документів, які визнають критичний тиск у системі інертизації, перебільшення якого призводить до порушення суцільності розділювального шару. При цьому цей тиск може бути різний для різного вантажу, а також для різної кількості вантажу, що залишився в донній частині вантажного танку після проведення технологічної операції з його розвантаження.

Контроль наявності розділювального шару у вантажному танку неможливий оптичними або візуальними засобами контролю, що зумовлюється непрозорим середовищем всередині танку. Суцільність розділювального шару, а також рівень, на якому він знаходиться у вантажному танку можуть бути визначені через вимірювання концентрації інертного газу в об'ємі танку [143, 144]. Відповідно до вимог Кодексу ІМО для газовозів, вантажні танки цих суден обов'язково повинні мати індикатори, які встановлюються на висотах, що відповідають 5 %, 50 % та 95 % від повного об'єму танка [145, 146]. Призначення цих індикаторів – контроль заповнення об'єму вантажних танків. Ці індикатори знаходяться безпосередньо на бічній поверхні танку в вантажному відділенні судна. Крім того, додатково встановлюються індикатори, що відповідають 20 %, 50 % та 80 % від повного об'єму танку. Візуалізація значень цих індикаторів виведена на пост керування, що знаходиться на вантажній палубі судна. Основне функціональне призначення цих індикаторів – контроль рівномірності завантаження в різних танках під час проведення вантажних операцій з метою забезпечення стійкості судна. Саме через комплексне використання цих двох груп індикаторів можливий контроль суцільності розділювального шару, що знаходиться у вантажному танку. При цьому як якісний критерій, за яким здійснюється цей контроль, необхідно обирати саме концентрацію інертного газу; як кількісний – час проведення процесу інертизації.

3.5.2. Визначення критеріїв проведення процесу інертизації вантажних танків судна-газовоза вантажомісткістю 38646 м³

Для підтвердження можливості подібного контролю на судні-газовозі з вантажомісткістю 38646 м³ виконувались такі дослідження.

Після закінчення операцій з розвантаження вантажу забезпечувався процес інертизації його вантажних танків (рис. 3.12). З цією метою у вантажні танки 6 подавався азот N₂, який генерувався за технологію Pressure Swing Adsorption (PSA) в генераторі 2.

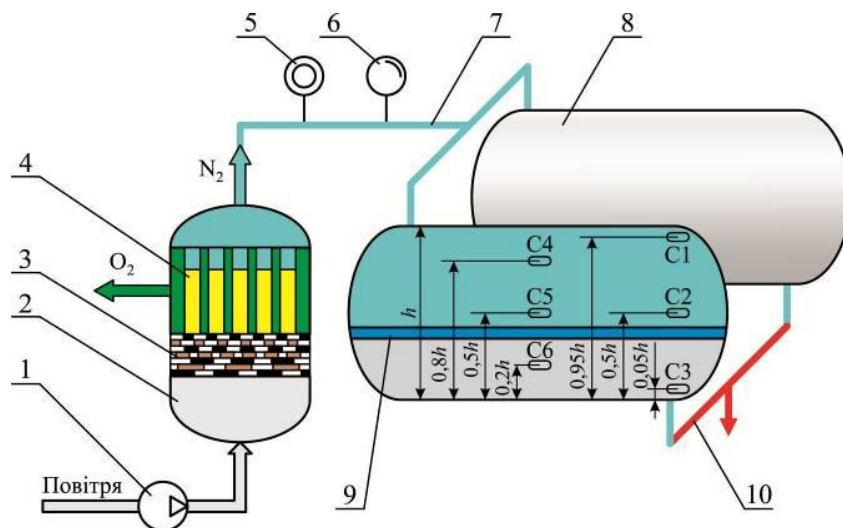


Рис. 3.12. Інертизація вантажних танків суден-газовозів азотом за допомогою технології PSA:

- 1 – компресор; 2 – генератор; 3 – комбінація фільтрів; 4 – адсорбційні судини; 5 – витратомір; 6 – манометр; 7 – магістраль подачі азоту; 8 – вантажний танк; 9 – розділювальний шар; 10 – магістраль видалення залишків вантажу

Отримання азоту за технологією PSA передбачає виділення азоту з повітря, яке нагнітається до генератора 2 компресором 1. Генератор азоту PSA виробляє азот за допомогою процесу, який починається, коли стиснене повітря проходить через комбінацію фільтрів 3 для видалення мастила та

вологи, потім очищене повітря спрямовується в адсорбційні судини 4, що містять вуглецеві молекулярні сита. Вода, що залишилася, вуглекислий газ та інші домішки адсорбуються матеріалом сита. За умови високих тисків у генераторі сита адсорбують кисень. Азот виробляється з бажаною чистотою, а кисень прямує назад в атмосферу. Генератори азоту PSA можуть виробляти азот із чистотою до 99,9995 %, що дуже актуально для підтримки пожежо- та вибухобезпеки у вантажних танках суден-газовозів, а також для попередження утворення льодових пробок та механічних забруднень у магістралях, якими азот прямує у вантажні танки.

Залишки вантажу, що витісняються азотом із танка 8, магістраллю 10 спрямовуються в інший танк, або в приймальну берегову магістраль. Розділювальний шар 9, що утворюється у вантажному танку, попереджує сумішоутворення парів залишків вантажу (які завжди присутні в танку після вантажних операцій) та інертного газу, що подається в танк.

Кількість та тиск азоту, що генерується в генераторі 2, контролюється за допомогою витратоміру 5 та манометра 6, що встановлені на магістралі 5. Кількість та стан вантажу, що знаходиться у вантажних танках 8, контролюються за допомогою індикаторів C1...C6, які дозволяють одночасно визначати рівень рідини в танку та концентрацію парів речовини, що знаходиться всередині танка. Контроль рівня рідини є обов'язковим показником під час завантаження та розвантаження зрідженого газу. Визначення складу парів речовини, що знаходиться в танку, дозволяє діагностувати як процеси завантаження / розвантаження, так і процеси дегазації / інертизації. При цьому залежно від типу вантажу та способу інертизації можливо одночасно визначати до десяти складових (азот, аміак, бутан, водень, діоксид вуглецю, ізобутан, кисень, метан, пропан, пропілен). Основні індикатори C1, C2, C3 забезпечували контроль показників на рівнях, що відповідають 5%, 50 % та 95 % від загальної глибини танка. Додаткові індикатори C4, C5, C6 забезпечували контроль показників на рівнях, що відповідають 20 %, 50 % та 80 % від загальної глибини танка.

Одним із завдань дослідження було визначення впливу тиску азоту (який використовувався як інертний газ) на стійкість розділювального шару, що попереджує сумішоутворення парів вантажу, які залишились у танку, та азоту, який забезпечує процес інертизації.

Під час дослідження виконувалось вимірювання концентрації азоту в наступних контрольних точках вантажного танку:

- на висоті $0,05h$, що відповідає 5 % від загальної висоти танка h (за допомогою індикатора С3);
- на висоті $0,2h$, що відповідає 20 % від загальної висоти танка h (за допомогою індикатора С6);
- на висоті $0,5h$, що відповідає 50 % від загальної висоти танка h (за допомогою індикаторів С2 та С5);
- на висоті $0,8h$, що відповідає 80 % від загальної висоти танка h (за допомогою індикатора С4);
- на висоті $0,95h$, що відповідає 95 % від загальної висоти танка h (за допомогою індикатора С1) – рис. 3.12.

Відповідно до характеристик генератора азоту, тиск азоту, що виробляється в генераторі, складає $0,7...1,05$ МПа з рекомендованим фрахтувальником експлуатаційним діапазоном $0,8...1,0$ МПа. У зв'язку з цим дослідження з визначення впливу тиску азоту, що потрапляє у вантажні танки для їх інертизації, на стійкість та суцільність розділювального шару виконувались зі значення $p_1=0,85$ МПа (яке приймалось як «базове») та подальшого покрокового збільшення тиску: $p_2=0,90$ МПа, $p_3=0,95$ МПа. Тривалість експерименту складала 12 год, фіксація значень концентрації азоту виконувалась через кожні 2 год. Контроль тиску азоту, що подавався у вантажні танки, концентрація азоту за висотою вантажного танка, а також час проведення вимірювань забезпечувався за допомогою мікроконтролерних систем управління [147-149].

Результати досліджень наведені в таблицях 3.1-3.3.

Таблиця 3.1

Зміна концентрації азоту під час тиску нагнітання $p_1=0,85$ МПа

Час, год	Концентрація азоту за різної висоти вантажного танка				
	0,95h	0,8h	0,5h	0,2h	0,05h
2	100	34	0	0	0
4	100	68	28	12	0
6	100	84	72	46	23
8	100	100	88	76	58
10	100	100	100	91	81
12	100	100	100	100	100

*Зеленим виділено час, за який завершується процес інертизації.

Таблиця 3.2

Зміна концентрації азоту під час тиску нагнітання $p_2=0,90$ МПа

Час, год	Концентрація азоту за різної висоти вантажного танка				
	0,95h	0,8h	0,5h	0,2h	0,05h
2	100	62	34	0	0
4	100	82	68	29	0
6	100	100	92	62	42
8	100	100	100	84	72
10	100	100	100	100	100
12	100	100	100	100	100

*Зеленим виділено час, за який завершується процес інертизації.

Таблиця 3.3

Зміна концентрації азоту під час тиску нагнітання $p_3=0,95$ МПа

Час, год	Концентрація азоту за різної висоти вантажного танка				
	0,95h	0,8h	0,5h	0,2h	0,05h
2	100	68	42	24	14
4	100	88	78	56	38
6	100	100	100	62	48
8	100	92	72	52	32
10	88	77	68	42	22
12	75	62	44	32	18

*Червоним виділено час, за який відбувається руйнування розділювального шару.

Для кращої візуалізації результати, що наведені в таблицях 3.1-3.3, подані як діаграми (рис. 3.13-3.15).

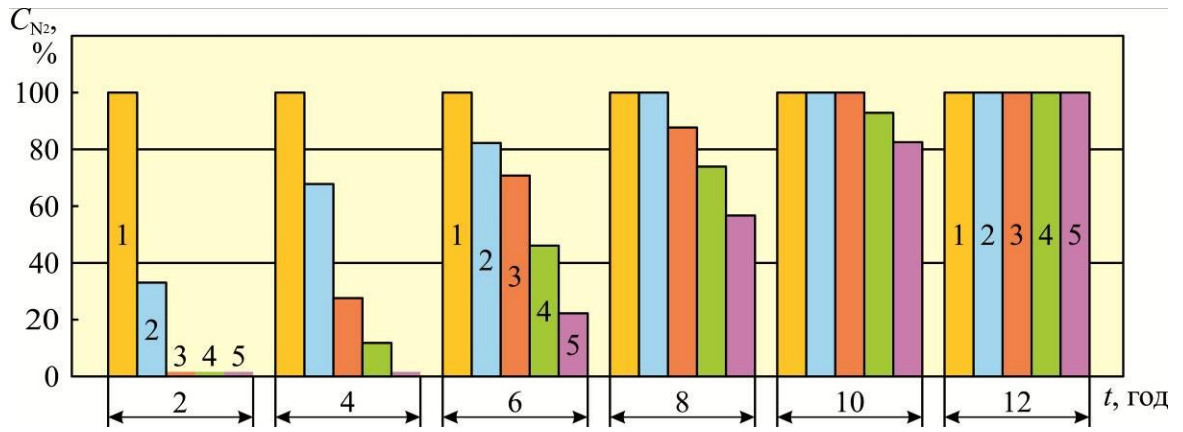


Рис. 3.13. Зміна концентрації азоту під час підтримання тиску нагнітання

$p_1=0,85$ МПа за різною висотою вантажного танка:

1 – $0,95h$; 2 – $0,8h$; 3 – $0,5h$; 4 – $0,2h$; 5 – $0,05h$

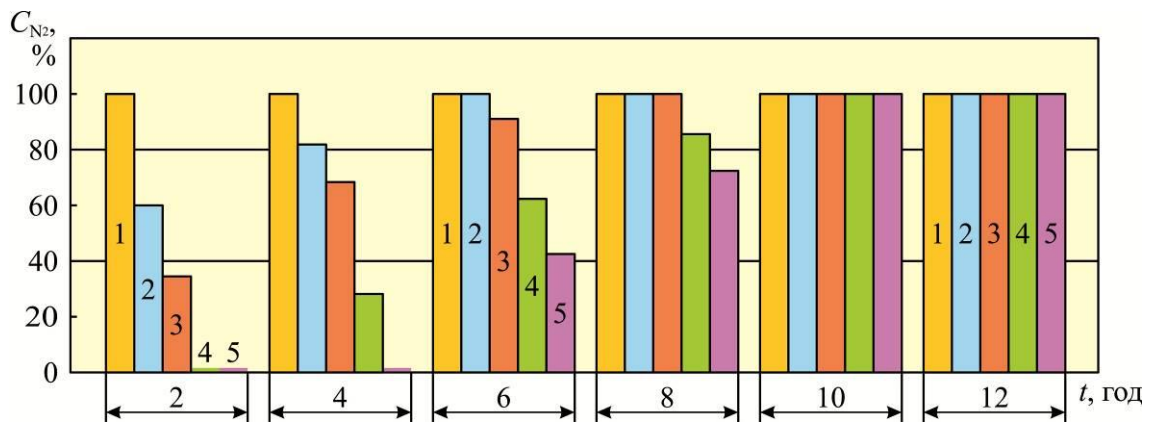


Рис. 3.14. Зміна концентрації азоту під час підтримання тиску нагнітання

$p_2=0,90$ МПа за різною висотою вантажного танка:

1 – $0,95h$; 2 – $0,8h$; 3 – $0,5h$; 4 – $0,2h$; 5 – $0,05h$

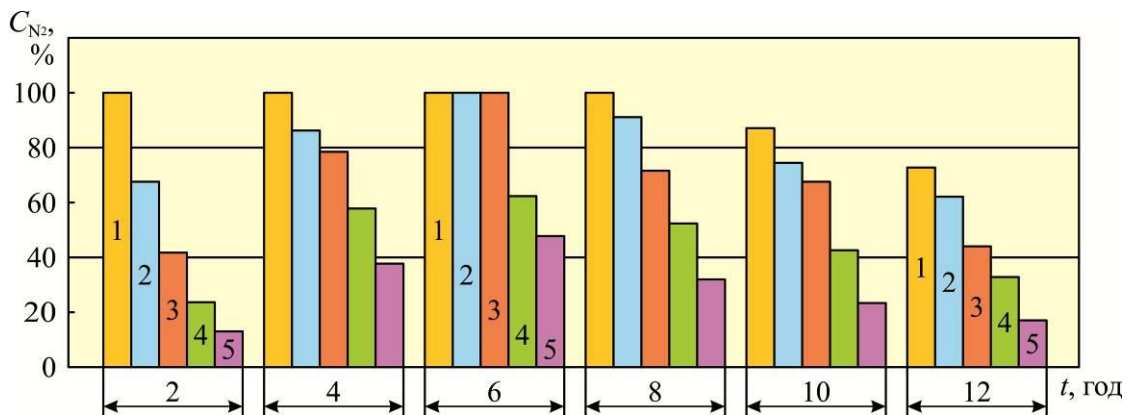


Рис. 3.15. Зміна концентрації азоту під час підтримання тиску нагнітання

$p_3=0,95$ МПа за різною висотою вантажного танка:

1 – $0,95h$; 2 – $0,8h$; 3 – $0,5h$; 4 – $0,2h$; 5 – $0,05h$

Порівняння результатів, що наведені в таблицях 3.1, 3.2 та рис. 3.13, 3.14 свідчать, що збільшення тиску нагнітання з 0,85 МПа до 0,90 МПа прискорює процес інертизації, при цьому час інертизації скорочується з 12 год до 10 год. Таке підвищення тиску не впливає на стійкість та суцільність розділювального шару, про що свідчить 100 %-а концентрація азоту за всією висотою вантажного танку.

Порівняння результатів, що наведені в таблицях 3.1, 3.3 та рис. 3.13, 3.15 свідчать, що збільшення тиску нагнітання з 0,85 МПа до 0,95 МПа призводить до поступового руйнування стійкості та суцільності розділювального шару. Це підтверджується зменшенням концентрації азоту у верхній частині вантажного танку за певний проміжок часу (у часовому інтервалі 8...10 год). При цьому відбувається поступове сумішутворення парів залишків вантажу та азоту. Це погіршує процес інертизації вантажних танків та змушує виконувати його повторно, що призводить до підвищення витрати азоту, збільшення витрати енергії на його виробництво або отримання, а також підвищує стоянковий час експлуатації судна. Також необхідно враховувати, що залишки вантажу, що витісняються з вантажних танків азотом, у подальшому спалюються на території берегових вантажних комплексів. Це негативно впливає на екологію портової території та прибережної акваторії [150-152].

Технологія проведення досліджень була погоджена з технічним відділом судноплавної компанії, що забезпечує технічний нагляд за судном та його енергетичною установкою. Крім того, послідовність проведення експериментів та результати, отримання яких передбачалось, були обговорені та схвалені з представниками фрахтівника.

Під час проведення експериментів виконувались усі вимоги щодо безпечної експлуатації суднового допоміжного обладнання, а також вимоги Кодексу ІМО для газовозів та вимоги MARPOL щодо попередження забруднення довкілля [153-156].

3.5.3. Визначення критеріїв проведення процесу інертизації вантажних танків судна-газовоза вантажомісткістю 42563 м³

Для збільшення масиву експериментальних даних та можливості поширення висновків із проведення експериментів, а також доцільності використання запропонованих технологій на інших суднах, дослідження, послідовність яких надана в п. 3.5.1, були поширені на судно-газовоз вантажомісткістю 42563 тонн [157].

Відповідно до характеристик генератора азоту, тиск азоту, що виробляється в генераторі, становить 0,85...1,20 МПа з рекомендованим фрахтувальником експлуатаційним діапазоном 0,90...1,10 МПа. У зв'язку з цим, дослідження щодо визначення впливу тиску азоту, який надходить у вантажні танки для їх інертизації, на стійкість і суцільність розділювального шару виконувались зі значення $p_1=0,95$ МПа (яке приймалося як «базове») і подальшого покрокового збільшення тиску на 0,05 МПа: $p_2=1,00$ МПа, $p_3=1,05$ МПа. Тривалість експерименту становила 14 год, фіксація значень концентрації азоту виконувалася через кожні 2 год.

Результати цих досліджень наведено в таблицях 3.4-3.6 та на рис. 3.16-3.18.

Таблиця 3.4

Зміна концентрації азоту під час тиску нагнітання $p_1=0,95$ МПа

Час, год	Концентрація азоту за різної висоти вантажного танка				
	0,95h	0,8h	0,5h	0,2h	0,05h
2	100	28	0	0	0
4	100	58	26	19	0
6	100	77	62	44	32
8	100	100	75	61	47
10	100	100	94	84	76
12	100	100	100	89	84
14	100	100	100	100	100

* Зеленим виділено час, за який завершується процес інертизації.

Таблиця 3.5

Зміна концентрації азоту під час тиску нагнітання $p_1=1,00$ МПа

Час, год	Концентрація азоту за різної висоти вантажного танка				
	0,95h	0,8h	0,5h	0,2h	0,05h
2	100	57	28	0	0
4	100	72	59	34	0
6	100	100	77	59	42
8	100	100	85	76	58
10	100	100	100	84	77
12	100	100	100	100	100
14	100	100	100	100	100

* Зеленим виділено час, за який завершується процес інертизації.

Таблиця 3.6

Зміна концентрації азоту під час тиску нагнітання $p_1=1,05$ МПа

Час, год	Концентрація азоту за різної висоти вантажного танка				
	0,95h	0,8h	0,5h	0,2h	0,05h
2	100	76	52	37	19
4	100	96	73	68	56
6	100	100	100	85	47
8	100	78	72	63	33
10	78	62	58	52	46
12	88	77	72	61	39
14	76	63	43	37	19

* Червоним виділено час, за який відбувається руйнування розділювального шару.

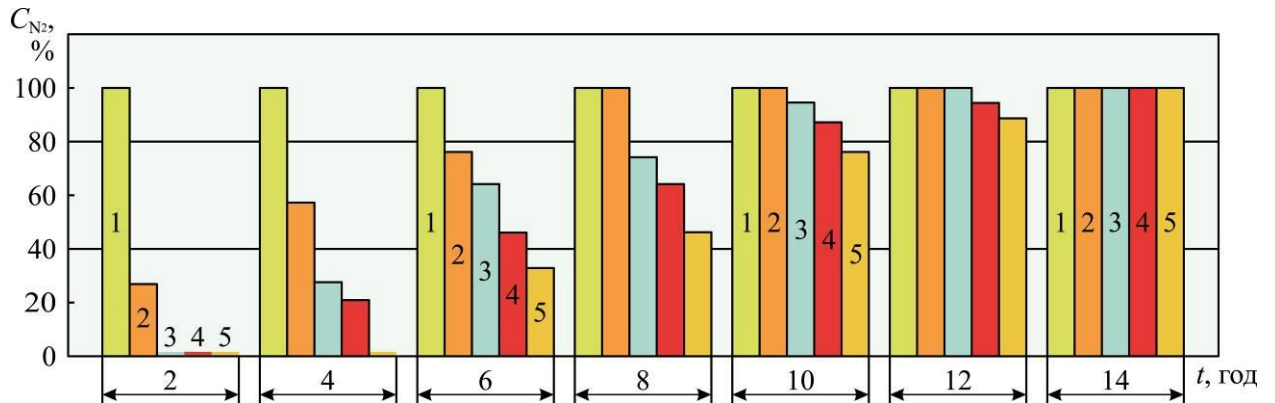


Рис. 3.16. Зміна концентрації азоту під час підтримання тиску нагнітання

$p_1 = 0.95 \text{ МПа}$ за різної висоти вантажного танка:

1 – $0.95h$; 2 – $0.8h$; 3 – $0.5h$; 4 – $0.2h$; 5 – $0.05h$

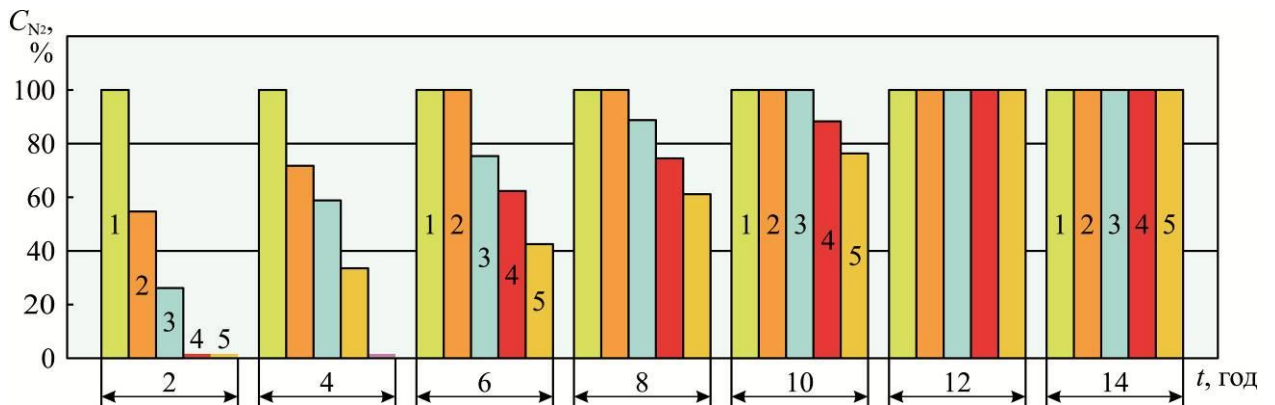


Рис. 3.17. Зміна концентрації азоту під час підтримання тиску нагнітання

$p_1 = 1.00 \text{ МПа}$ за різної висоти вантажного танка:

1 – $0.95h$; 2 – $0.8h$; 3 – $0.5h$; 4 – $0.2h$; 5 – $0.05h$

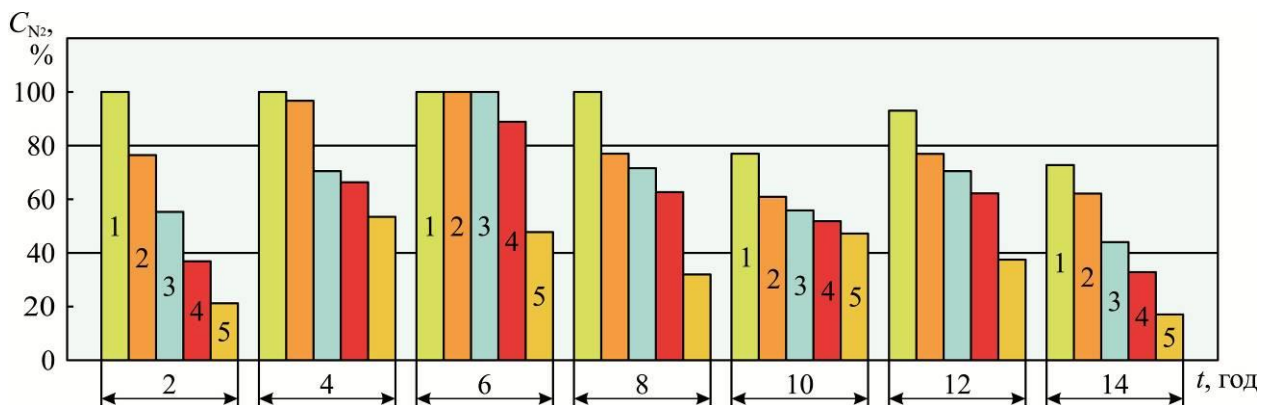


Рис. 3.18. Зміна концентрації азоту під час підтримання тиску нагнітання

$p_1 = 1.05 \text{ МПа}$ за різної висоти вантажного танка:

1 – $0.95h$; 2 – $0.8h$; 3 – $0.5h$; 4 – $0.2h$; 5 – $0.05h$

Зіставлення результатів, наведених у таблицях 3.4, 3.5 та на рис. 3.16, 3.17, свідчать, що збільшення тиску нагнітання з 0,95 МПа до 1,00 МПа прискорює процес інертизації. При цьому час інертизації скорочується з 14 год до 12 год. Таке підвищення тиску не впливає на стійкість і суцільність розділювального шару, про що свідчить 100 % концентрація азоту по всій висоті вантажного танка в кінцевий момент досліджень.

Порівняння результатів, наведених у таблицях 3.4, 3.6 та рис. 3.16, 3.18, свідчать, що збільшення тиску нагнітання з 0,95 МПа до 1,05 МПа призводить до поступового руйнування стійкості та порушення цілісності розділювального шару. Це підтверджується зменшенням концентрації азоту у верхній частині вантажного танка за певний проміжок часу (10...12 год) та коливань значення концентрації азоту по висоті вантажного танка (у часовому інтервалі 10...14 год).

3.5.4. Визначення критеріїв проведення процесу інертизації вантажних танків судна-газовоза вантажомісткістю 88248 м³

За аналогічною технологічною схемою були виконані випробування на судні-газовозі вантажомісткістю 88248 тонн.

Відповідно до характеристик генератора азоту, тиск азоту, що виробляється в генераторі, становить 0,85...1,10 МПа з рекомендованим фрахтувальником експлуатаційним діапазоном 0,95...1,05 МПа. У зв'язку з цим, дослідження щодо визначення впливу тиску азоту, який надходить у вантажні танки для їх інертизації, на стійкість і суцільність розділювального шару виконувались зі значення $p_1=0,90$ МПа (яке приймалося як «базове») і подальшого покрокового збільшення тиску на 0,05 МПа: $p_2=0,95$ МПа, $p_3=1,00$ МПа. Тривалість експерименту становила 14 год, фіксація значень концентрації азоту виконувалася через кожні 2 год.

Результати досліджень наведено в таблицях 3.7-3.9 та на рис. 3.19-3.21.

Таблиця 3.7

Зміна концентрації азоту під час тиску нагнітання $p_1=0,90$ МПа

Час, год	Концентрація азоту за різної висоти вантажного танка				
	0,95h	0,8h	0,5h	0,2h	0,05h
2	100	37	17	0	0
4	100	63	44	32	8
6	100	85	64	54	32
8	100	91	73	62	53
10	100	100	82	71	60
12	100	100	92	82	77
14	100	100	100	100	100

*Зеленим виділено час, за який завершується процес інертизації.

Таблиця 3.8

Зміна концентрації азоту під час тиску нагнітання $p_1=0,95$ МПа

Час, год	Концентрація азоту за різної висоти вантажного танка				
	0,95h	0,8h	0,5h	0,2h	0,05h
2	100	56	35	11	0
4	100	72	66	44	17
6	100	92	77	72	37
8	100	100	92	82	61
10	100	100	100	93	83
12	100	100	100	100	92
14	100	100	100	100	100

*Зеленим виділено час, за який завершується процес інертизації.

Таблиця 3.9

Зміна концентрації азоту під час тиску нагнітання $p_1=1,00$ МПа

Час, год	Концентрація азоту за різної висоти вантажного танка				
	0,95h	0,8h	0,5h	0,2h	0,05h
2	100	77	63	44	21
4	100	97	83	68	62
6	100	100	76	57	43
8	100	78	54	36	17
10	78	71	43	40	36
12	87	62	52	44	38
14	83	77	55	36	33

*Червоним виділено час, за який відбувається руйнування розділювального шару.

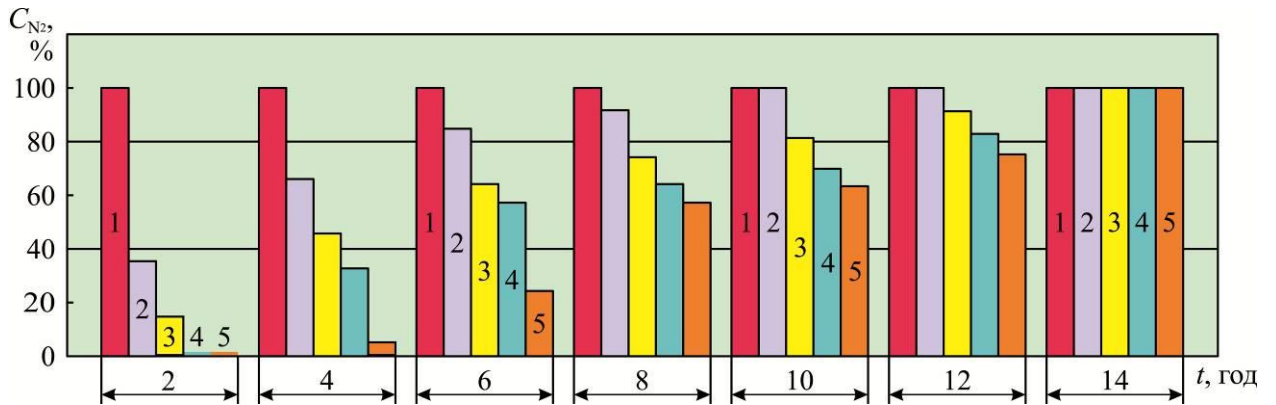


Рис. 3.19. Зміна концентрації азоту під час підтримання тиску нагнітання

$p_1=0,90$ МПа за різної висоти вантажного танка:

1 – $0,95h$; 2 – $0,8h$; 3 – $0,5h$; 4 – $0,2h$; 5 – $0,05h$

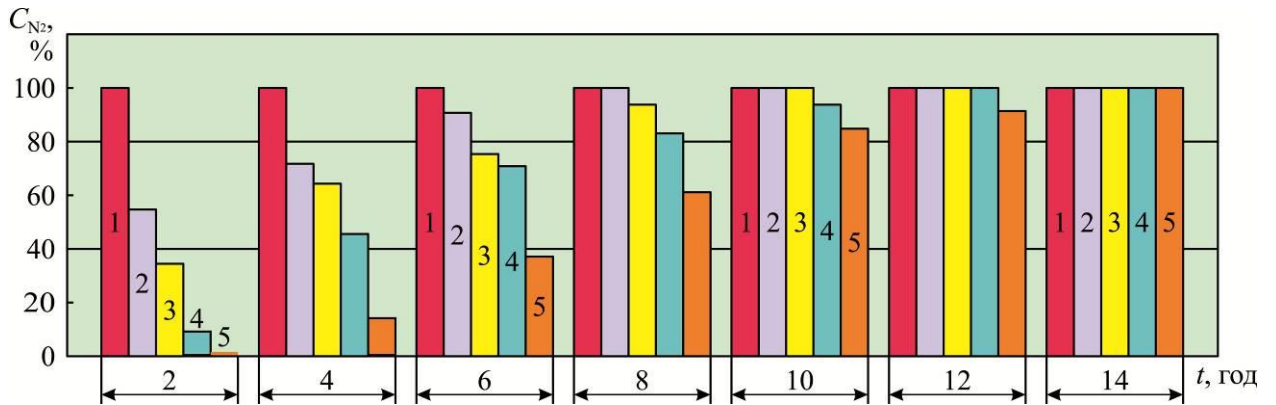


Рис. 3.20. Зміна концентрації азоту під час підтримання тиску нагнітання

$p_1=0,95$ МПа за різної висоти вантажного танка:

1 – $0,95h$; 2 – $0,8h$; 3 – $0,5h$; 4 – $0,2h$; 5 – $0,05h$

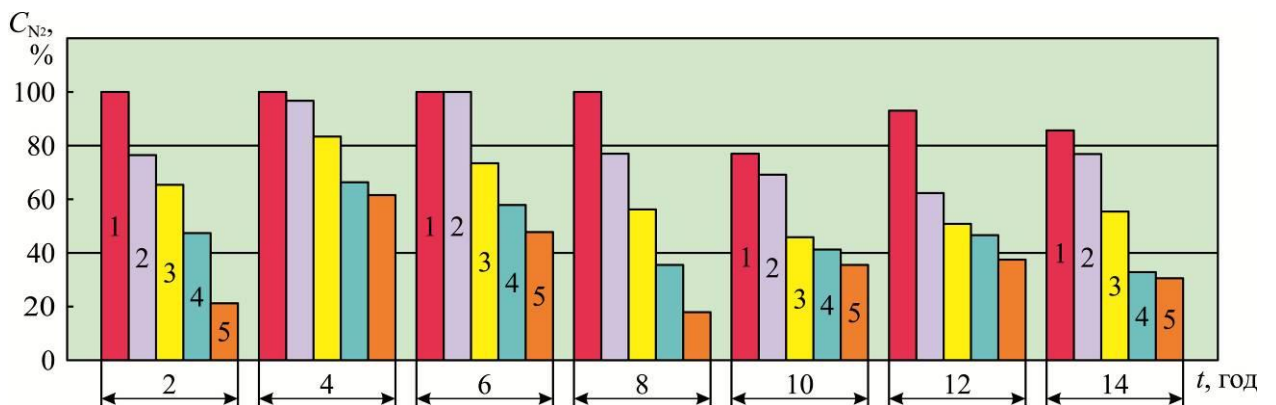


Рис. 3.21. Зміна концентрації азоту під час підтримання тиску нагнітання

$p_1=1,00$ МПа за різної висоти вантажного танка:

1 – $0,95h$; 2 – $0,8h$; 3 – $0,5h$; 4 – $0,2h$; 5 – $0,05h$

Зіставлення результатів, наведених у таблицях 3.6, 3.7 та на рис. 3.19, 3.20, свідчать, що збільшення тиску нагнітання з 0,90 МПа до 0,95 МПа прискорює процес інертизації. При цьому час інертизації скорочується з 14 годин до 12 годин. Таке підвищення тиску не впливає на стійкість і суцільність розділювального шару, про що свідчить 100 % концентрація азоту по всій висоті вантажного танка в кінцевий момент досліджень.

Порівняння результатів, наведених у таблицях 3.6, 3.8 та рис. 3.19, 3.21 свідчать, що збільшення тиску нагнітання з 0,90 МПа до 1,00 МПа призводить до поступового руйнування стійкості та порушення цілісності розділювального шару. Це підтверджується зменшенням концентрації азоту у верхній частині вантажного танка за певний проміжок часу (10...12 годин) та коливань значення концентрації азоту по висоті вантажного танка (у часовому інтервалі 10...14 годин).

3.5.5. Визначення критеріїв проведення процесу інертизації вантажних танків суден-газовозів вантажомісткістю 145673 м³ та 162233 м³

Аналогічні випробування виконувались для суден-газовозів вантажомісткістю 145673 м³ та 162233 м³. Результати цих досліджень наведено у вигляді діаграм, що подані на рис. 3.22-3.24 (для судна-газовоза вантажомісткістю 145673 м³) та на рис. 3.25-3.27 (для судна-газовоза вантажомісткістю 162233 м³).

Рекомендований тиск у системі генерації інертного газу для судна-газовозу вантажомісткістю 145673 м³ знаходився в межах 0,90...1,20 МПа, тому під час досліджень підтримувались значення 0,95 МПа, 1,05 МПа та 1,15 МПа. Аналогічні показники для судна-газовозу вантажомісткістю 162233 м³ знаходились у діапазоні 0,95...1,25 МПа та під час досліджень підтримувались значення 0,95 МПа, 1,05 МПа та 1,15 МПа.

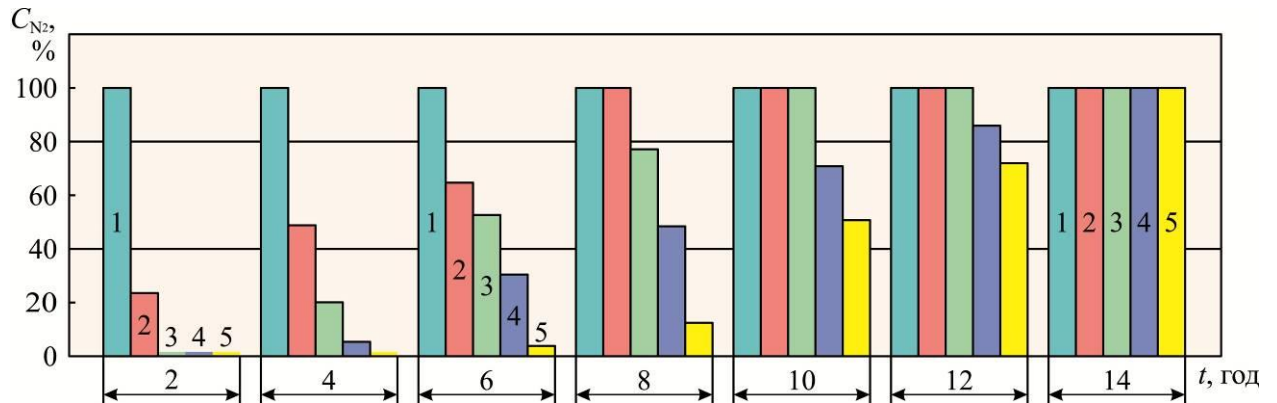


Рис. 3.22. Зміна концентрації азоту під час підтримання тиску нагнітання

$p_1=0,95$ МПа за різної висоти вантажного танка:

1 – $0,95h$; 2 – $0,8h$; 3 – $0,5h$; 4 – $0,2h$; 5 – $0,05h$

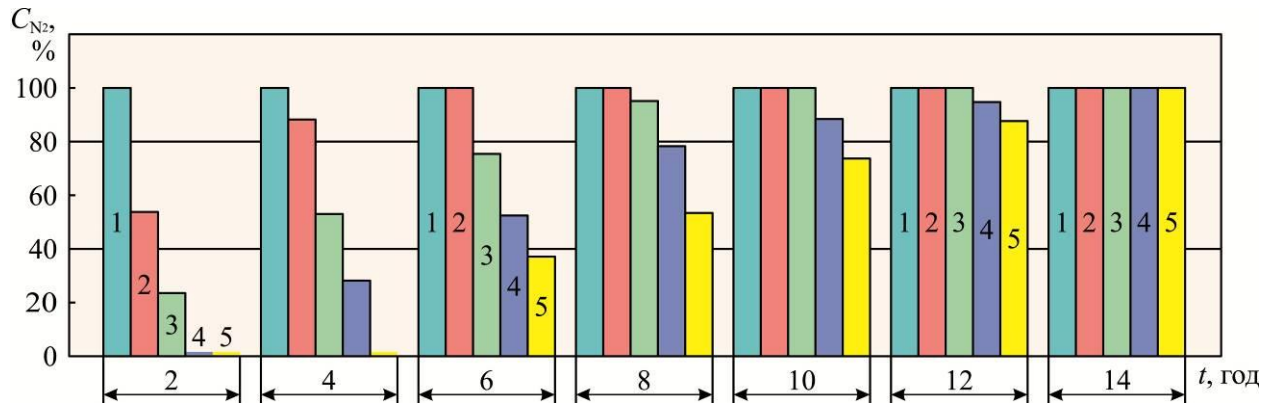


Рис. 3.23. Зміна концентрації азоту під час підтримання тиску нагнітання

$p_1=1,05$ МПа за різної висоти вантажного танка:

1 – $0,95h$; 2 – $0,8h$; 3 – $0,5h$; 4 – $0,2h$; 5 – $0,05h$

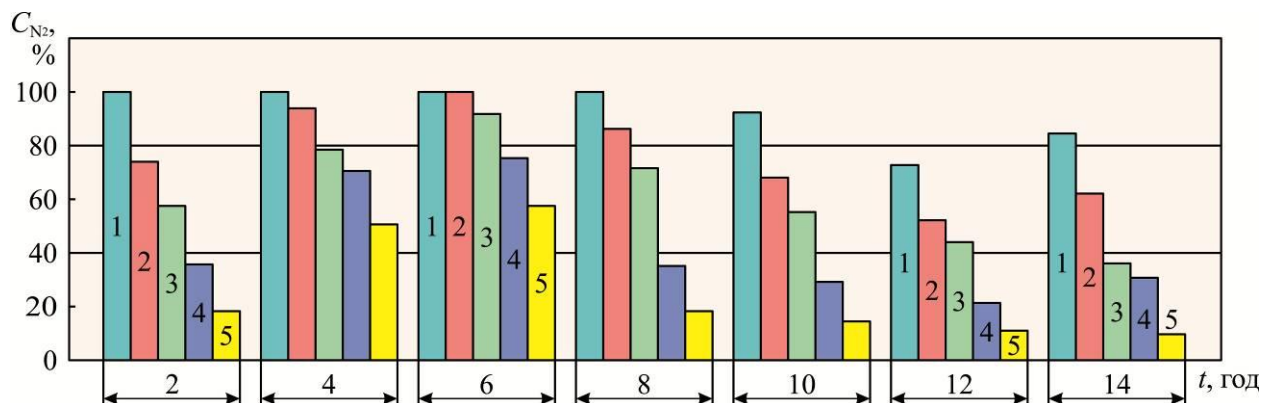


Рис. 3.24. Зміна концентрації азоту під час підтримання тиску нагнітання

$p_1=1,15$ МПа за різної висоти вантажного танка:

1 – $0,95h$; 2 – $0,8h$; 3 – $0,5h$; 4 – $0,2h$; 5 – $0,05h$

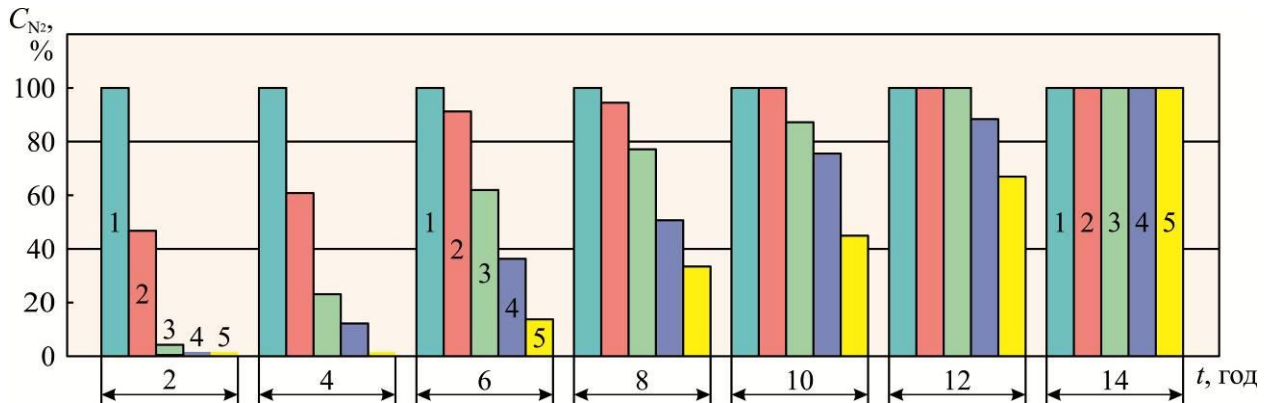


Рис. 3.25. Зміна концентрації азоту під час підтримання тиску нагнітання

$p_1=0,95$ МПа за різної висоти вантажного танка:

1 – $0,95h$; 2 – $0,8h$; 3 – $0,5h$; 4 – $0,2h$; 5 – $0,05h$

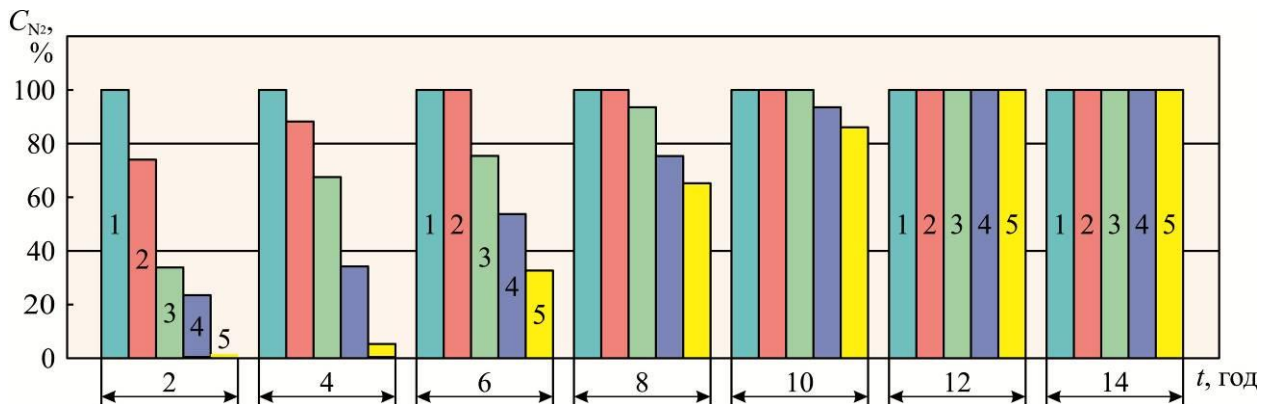


Рис. 3.26. Зміна концентрації азоту під час підтримання тиску нагнітання

$p_1=1,05$ МПа за різної висоти вантажного танка:

1 – $0,95h$; 2 – $0,8h$; 3 – $0,5h$; 4 – $0,2h$; 5 – $0,05h$

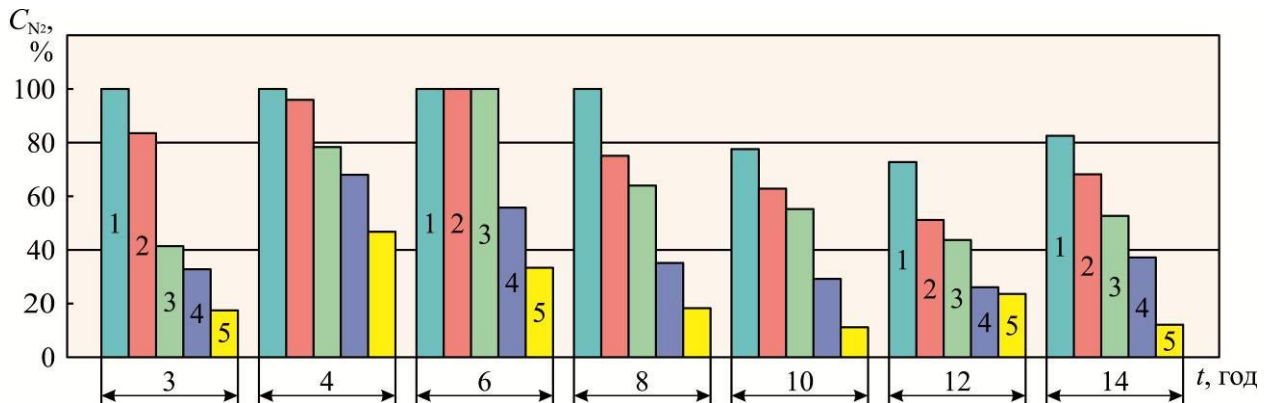


Рис. 3.27. Зміна концентрації азоту під час підтримання тиску нагнітання

$p_1=1,15$ МПа за різної висоти вантажного танка:

1 – $0,95h$; 2 – $0,8h$; 3 – $0,5h$; 4 – $0,2h$; 5 – $0,05h$

Результати, що наведені на рис. 3.22-3.24 та рис. 3.25-3.27, збігаються з результатами досліджень на інших суднах-газовозах. Це додатково підтверджує їх коректність.

3.5.6. Порівняння експериментальних та аналітичних результатів

Для визначення адекватності математичної моделі процесів інертизації вантажних танків суден-газовозів (аналітичні вирази якої надані в пп. 3.3-3.4, розрахунок за якими здійснювався за допомогою програмного продукту ANSYS [158, 159]) та її відповідності результатам, що були отримані під час проведення випробувань з визначення концентрації азоту в об'ємі вантажного танку під час їх інертизації (пп. 3.5.2-3.5.5) було проведено порівняння цих результатів.

При цьому були обрані найбільш інформативна ділянка вантажного танку та на найбільш інформативний проміжок часу вимірювання. За такі були визначені рівні вантажного танку, що відповідають 20 % та 50 % його висоти ($0,2h$ та $0,5h$), та час вимірювання 6 год та 8 год. Цей вибір обґрунтовувався, по-перше, намаганням зменшити кількість статистичного матеріалу, по-друге, потрібно обрати найбільш значний з інформаційного погляду проміжок експерименту, який дозволяє оцінити перебіг процесу інертизації вантажного танку.

Результати, що відповідають цим значенням, наведені в таблиці 3.10.

Також у таблиці 3.10 подані розрахункові значення $|\Delta C_{N2}|$ відносного відхилення експериментально визначеної $C_{N2}^{екс}$ та аналітично отриманої $C_{N2}^{ан}$ концентрації азоту у вантажному танку під час інертизації. Це значення отримано з виразу

$$|\Delta C_{N2}| = \left| \frac{C_{N2}^{екс} - C_{N2}^{ан}}{C_{N2}^{екс}} \right|.$$

Модульне значення відносного відхилення концентрації прийнято для більш зручної побудови графічних залежностей.

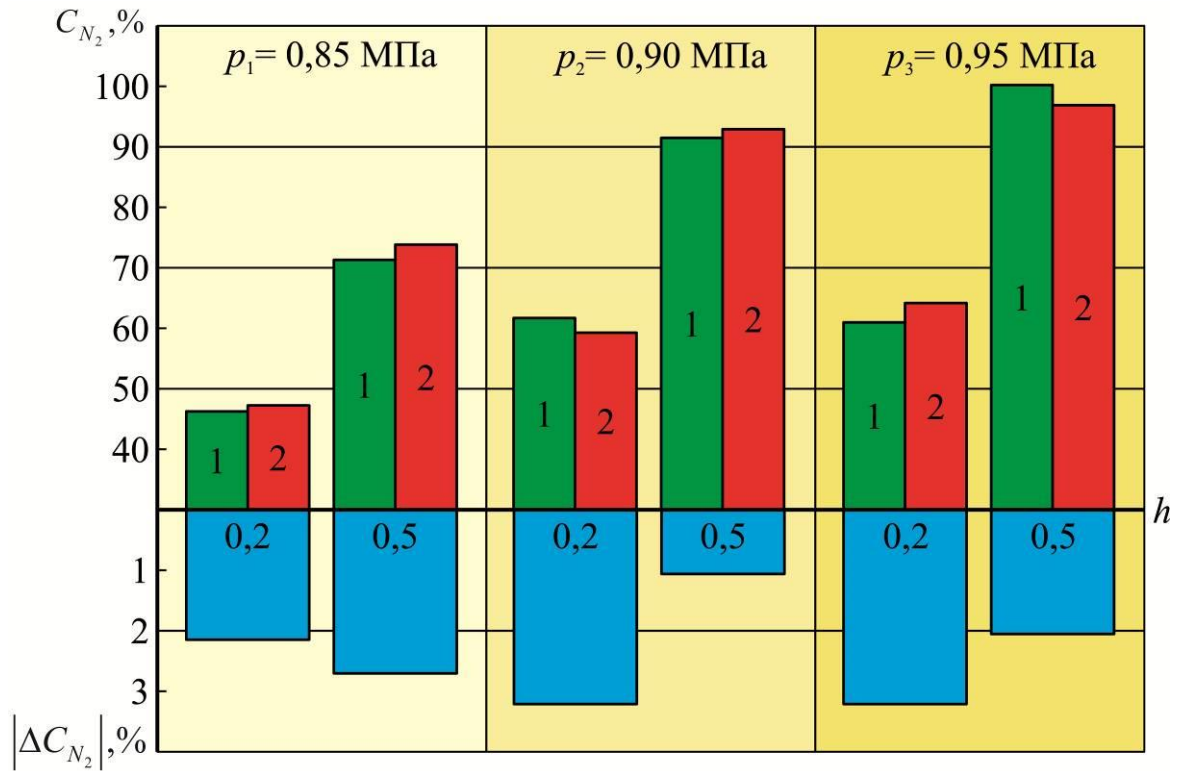
Таблиця 3.10

Порівняння значень концентрації азоту у вантажному танку під час інертизації, визначених експериментально та аналітично

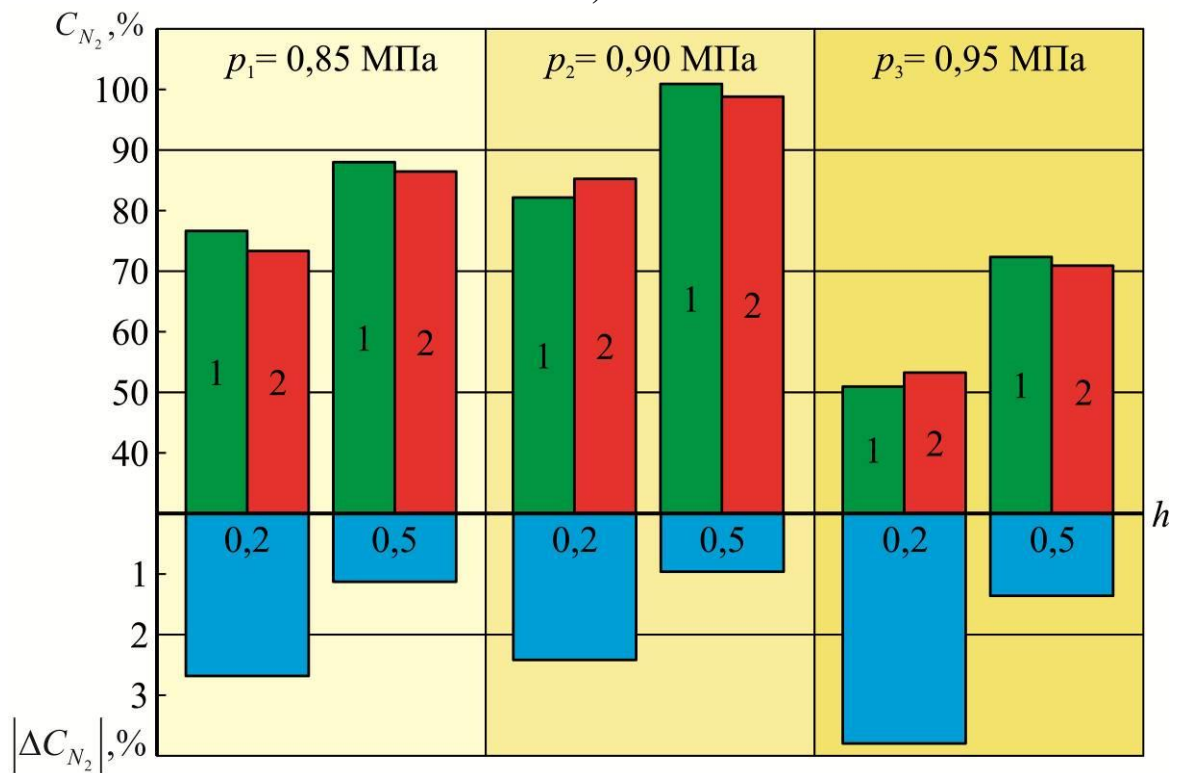
Судно-газовоз вантажомісткістю 38646 м ³						
Час, год	$p_1=0,85$ МПа		$p_2=0,90$ МПа		$p_3=0,95$ МПа	
	0,2h	0,5h	0,2h	0,5h	0,2h	0,5h
6	$\frac{46}{47}$ – 2,17	$\frac{72}{74}$ – 2,78	$\frac{62}{60}$ 3,23	$\frac{92}{93}$ – 1,08	$\frac{62}{64}$ – 3,23	$\frac{100}{98}$ 2,00
8	$\frac{76}{74}$ 2,63	$\frac{88}{87}$ 1,14	$\frac{84}{86}$ – 2,38	$\frac{100}{99}$ 1,00	$\frac{52}{54}$ – 3,84	$\frac{72}{71}$ 1,39
Судно-газовоз вантажомісткістю 42563 м ³						
Час, год	$p_1=0,95$ МПа		$p_2=1,00$ МПа		$p_3=1,05$ МПа	
	0,2h	0,5h	0,2h	0,5h	0,2h	0,5h
6	$\frac{44}{43}$ 2,27	$\frac{62}{61}$ 1,61	$\frac{59}{61}$ – 3,39	$\frac{77}{79}$ – 2,60	$\frac{85}{88}$ – 3,53	$\frac{100}{99}$ 1,00
8	$\frac{61}{63}$ – 3,28	$\frac{75}{76}$ – 1,33	$\frac{76}{75}$ 1,32	$\frac{85}{87}$ – 2,35	$\frac{63}{64}$ – 1,58	$\frac{72}{70}$ 2,78
Судно-газовоз вантажомісткістю 88248 м ³						
Час, год	$p_1=0,90$ МПа		$p_2=0,95$ МПа		$p_3=1,00$ МПа	
	0,2h	0,5h	0,2h	0,5h	0,2h	0,5h
6	$\frac{54}{56}$ – 3,70	$\frac{64}{63}$ 1,56	$\frac{72}{70}$ 2,78	$\frac{77}{79}$ – 2,60	$\frac{57}{55}$ 3,51	$\frac{76}{75}$ 1,32
8	$\frac{62}{60}$ 3,23	$\frac{73}{71}$ 2,74	$\frac{82}{85}$ – 3,66	$\frac{92}{95}$ – 3,26	$\frac{36}{37}$ – 2,78	$\frac{54}{53}$ 1,85

У чисельнику – результати під час вимірювання та під час моделювання,
у знаменнику – відносне відхилення цих значень одне від одного

За результатами таблиці 3.10 побудовані діаграми, що наведені на рис. 3.28-3.30.

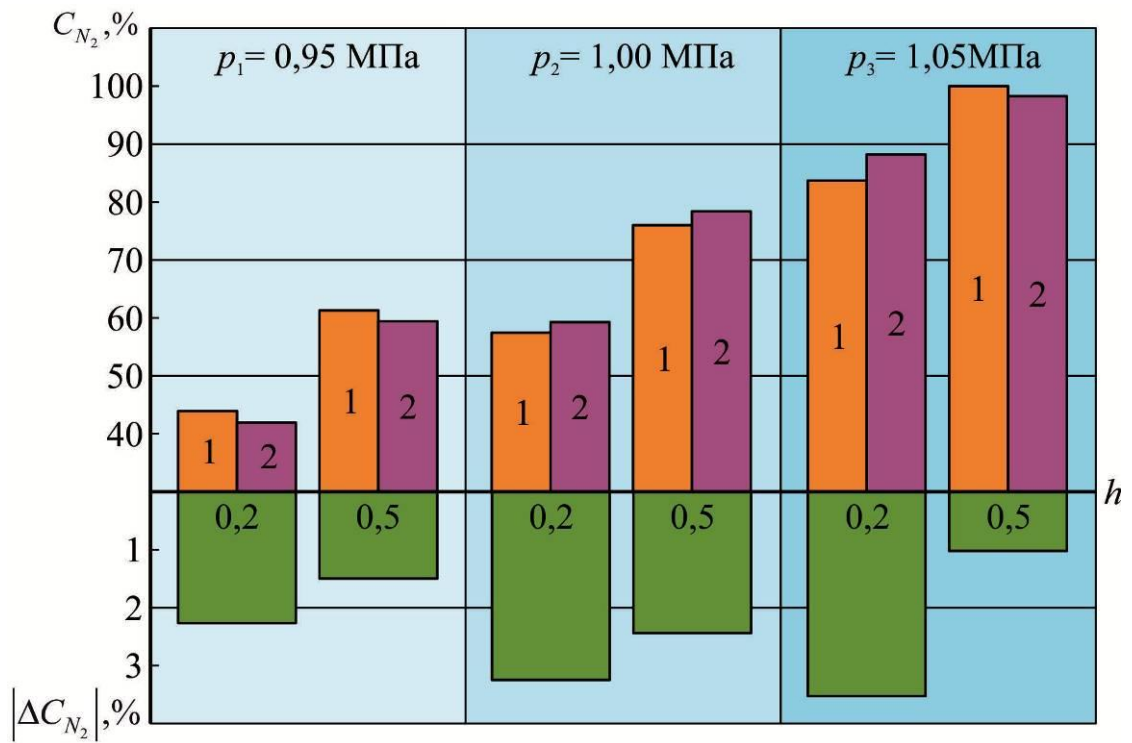


а)

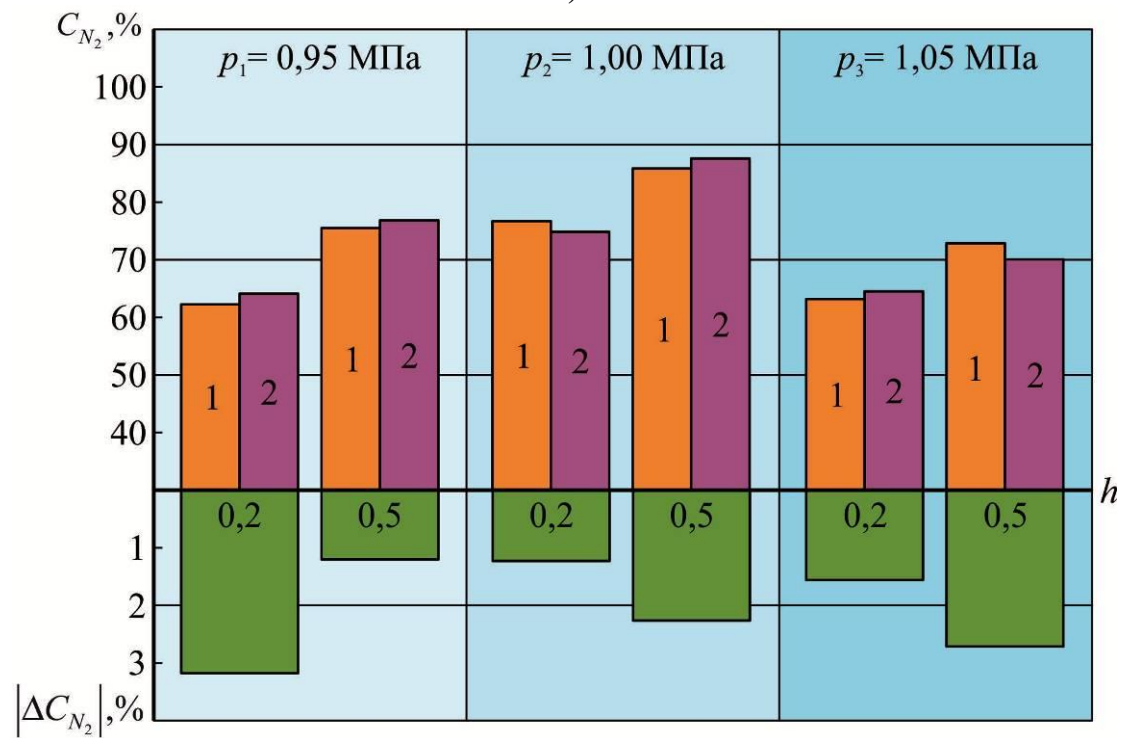


б)

Рис. 3.28. Концентрація азоту C_{N_2} на різній висоті вантажного танка h та відносно відхилення $|\Delta C_{N_2}|$ між експериментальним 1 та аналітичним 2 її визначенням для судна-газовоза вантажомісткістю 38646 м³:
 а – час випробування 6 годин, б – час випробування 8 годин

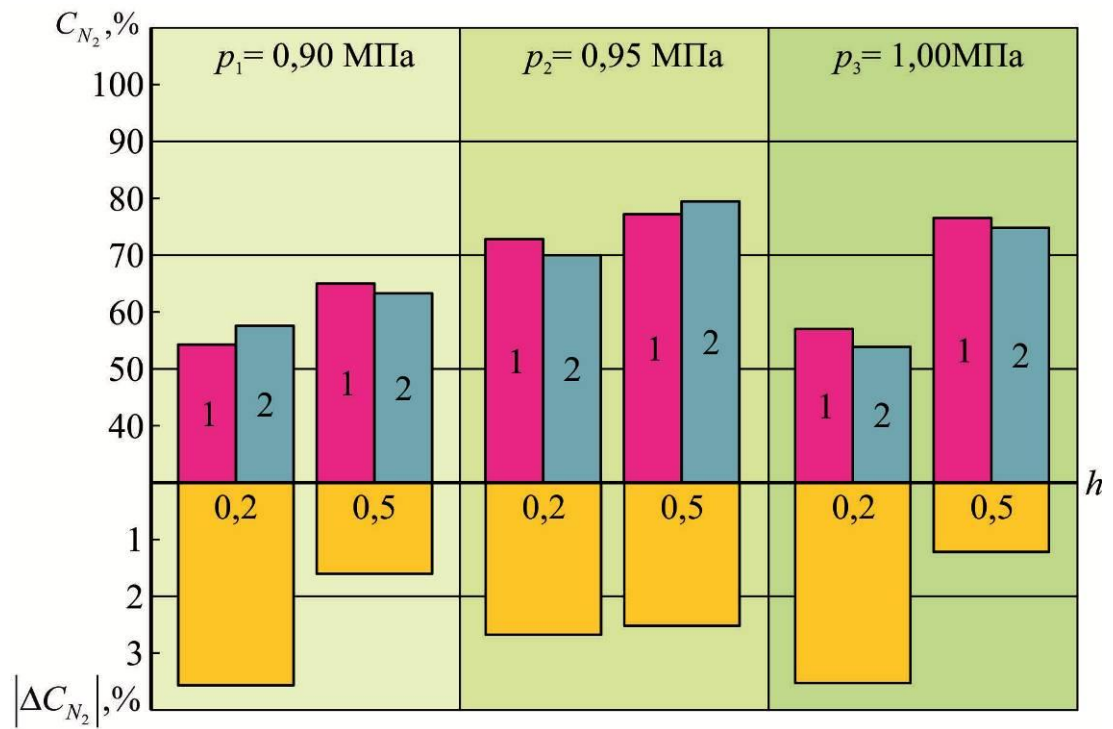


а)

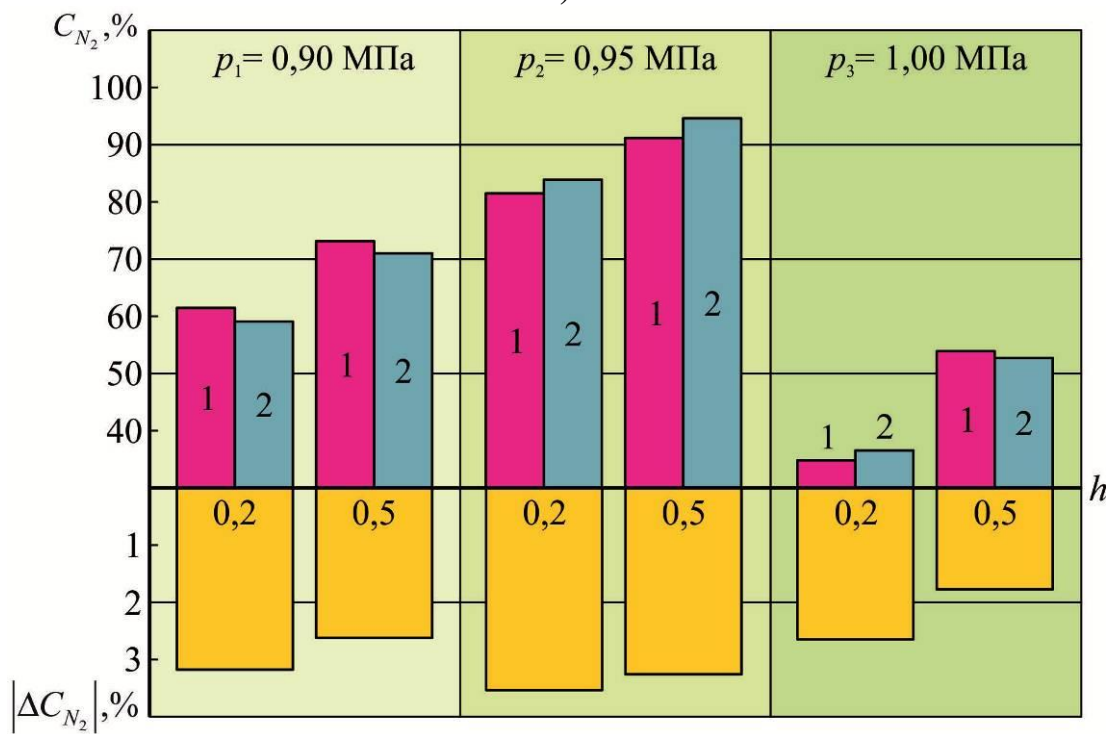


б)

Рис. 3.29. Концентрація азоту C_{N_2} на різній висоті вантажного танка h та відносно відхилення $|\Delta C_{N_2}|$ між експериментальним 1 та аналітичним 2 її визначенням для судна-газовоза вантажомісткістю 42563 м³:
 а – час випробування 6 годин, б – час випробування 8 годин



а)



б)

Рис. 3.30. Концентрація азоту C_{N_2} на різній висоті вантажного танка h та відносно відхилення $|\Delta C_{N_2}|$ між експериментальним 1 та аналітичним 2 її визначенням для судна-газовоза вантажомісткістю 88248 м³:
 а – час випробування 6 годин, б – час випробування 8 годин

За результатами, що наведені в таблиці 3.10 та на рис. 3.28-3.30 визначимо, що розбіжність значень концентрації азоту у вантажному танку, що отримані аналітичним та експериментальним шляхом, не перевищує 4 %, при цьому в більшості випадків складає 1,3...2,6 %. Це свідчить про адекватність математичної моделі та її відповідності експериментальним дослідженням.

3.6. Висновки за розділом 3

Як результат досліджень, наведених в розділі 3, визначимо наступне.

1. Інертизація вантажних танків суден-газовозів супроводжується постійною зміною декількох показників, що характеризують стан атмосфери вантажного танку, а також перебіг процесу інертизації. Основними з цих показників є концентрація інертного газу та залишків вантажу в обсязі вантажного танку; стан розділювального шару, якій попереджує сумішутворення між парами вантажу, що залишились у вантажному танку та інертним газом, що подається до вантажного танку; тиск інертного газу; тривалість інертизації.

2. Якісним показником процесу інертизації вантажних танків суден-газовозів є концентрація інертного газу в атмосфері вантажного танку; кількісним – тривалість інертизації.

3. Визначення концентрації інертного газу в атмосфері вантажного танку можливо аналітичним та експериментальним шляхом. В першому випадку це забезпечується через розв'язання рівнянь конвективної дифузії відносно інертного газу, в другому – за допомогою моніторингу концентрації інертного газу на різних рівнях вантажного танку. Порівняння експериментальних та аналітичних результатів, що були виконані під час досліджень процесу інертизації вантажних танків суден-газовозів

вантажомісткістю 38646 м³, 42563 м³, 88248 м³, 145673 м³ та 162233 м³ визначили, що в разі коректного проведення випробувань та розрахунків розходження між цими результатами не перевищує не перевищує 4 %, при цьому в більшості випадків складає 1,3...2,6 %.

4. Експериментально підтверджено наявність надкритичного тиску інертного газу, перевищення якого призводить до руйнування розділювального шару, якій попереджує сумішутворення між парами вантажу, що залишились у вантажному танку та інертним газом, що подається до вантажного танку. Визначення цього негативного явища можливо через моніторинг концентрації інертного газу на різних рівнях вантажного танку. Експериментальні дослідження, що були виконані на суднах-газовозах вантажомісткістю 38646 м³, 42563 м³, 88248 м³, 145673 м³ та 162233 м³ дозволили визначити цей тиск та надати практичні рекомендації щодо його запобігання. Також для кожного з суден-газовозів з вказаною вантажомісткістю було визначено оптимальний з точки зору забезпечення якісного та кількісного показників процесу інертизації тиск інертного газу, що подається до вантажного танку.

4. АНАЛІЗ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ ТА ЕКОЛОГІЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ МЕТОДІВ ІНЕРТИЗАЦІЇ ВАНТАЖНИХ ТАНКІВ СУДЕН-ГАЗОВОЗІВ

Четвертий розділ дисертаційного дослідження присвячено розв'язанню другого та третього допоміжних завдань, якими є:

- визначення енергетичної ефективності процесу інертизації вантажних танків суден-газовозів;
- визначення екологічної ефективності процесу інертизації вантажних танків суден-газовозів.

Основні результати розділу 4 наведені в джерелах [44], [80], [168].

4.1. Аналіз енергетичної ефективності методів інертизації вантажних танків суден-газовозів

Енергетична ефективність процесу інертизації вантажних танків суден-газовозів визначається витратами енергії на його забезпечення [160-162]. При цьому основним споживачем цих витрат є генератор інертних газів, потужність якого залежно від вантажомісткості судна, на якому він встановлено, коливається в межах 350...2500 кВт. Водночас енергетична ефективність процесу інертизації пов'язана з кількістю азоту, що витрачається для забезпечення цього процесу, та тривалістю цього процесу. Збільшення цих показників знижує енергетичну ефективність процесу інертизації [163-165].

Дослідження щодо визначення найбільш ефективного з енергетичної точки зору способу інертизації вантажних танків виконувались на основі статистичних даних щодо забезпечення даної операції на судах-газовозах різної вантажомісткості. Обробка та аналіз інформації з інертизації

вантажних танків виконувалася для суден-газовозів, обсяги вантажних танків яких становили 38646 м³, 42427 м³, 42563 м³, 72312 м³, 88248 м³, 88274 м³, 88302 м³, 145673 м³, 146817 м³, 162233 м³. Під час проведення досліджень дані судна були скомплектовані в три групи: менш за 50000 м³, 50000...100000 м³, більш за 100000 м³. Усі судна виконували перевезення одного й того ж вантажу між портами Близького Сходу та Китаю. На всіх судах було можливе виконання каскадної, напівкаскадної та паралельної схем інертизації вантажних танків [44, 80].

Після кожного транспортування та розвантаження зрідженого газу в порту виконувався процес інертизації вантажних танків. Інертизація вантажних танків виконувалася з допомогою азоту. Для виробництва азоту використовувалася суднова система генерації. Для кожного судна після першого транспортування процес інертизації виконувався за каскадною схемою. Друге транспортування завершувалося інертизацією за напівкаскадною схемою, третє – за паралельною. За період проведення досліджень кожне із суден здійснило понад десять перевезень зрідженого газу. Це забезпечувало необхідний масив експериментальних даних, а також дозволяло зробити висновки щодо коректності проведення експериментів.

Порівняння енергетичної ефективності каскадної, напівкаскадної та паралельної схем інертизації вантажних танків під час використання азоту доцільно виконувати за двома показниками:

- 1) витрата азоту, необхідного для забезпечення цього процесу;
- 2) тривалість проведення процесу інертизації.

Ці показники залежать від вантажомісткості суден-газовозів. Для оцінки ефективності систем інертизації вантажних танків уведемо такі позначення:

G_c , G_s , G_p – витрата азоту, який необхідний для забезпечення інертизації за каскадною, напівкаскадною та паралельною схемами, відповідно;

t_c , t_s , t_p – тривалість проведення процесу інертизації за каскадною, напівкаскадною та паралельною схемами, відповідно.

4.1.1. Результати досліджень на суднах-газовозах вантажомісткістю менш ніж 50000 м³

До цієї групи були віднесені судна-газовози з вантажомісткістю 38646 м³, 42427 м³, 42563 м³.

Витрата азоту, яка була необхідна для забезпечення процесу інертизації вантажних танків, визначалась за допомогою витратоміру, що був встановлений після генератора інертних газів (щодо рис. 3.4, 3.5, 3.5 п. 3.2 – після елементу «Вхід азоту, N₂»). Як генератор азоту використовувався генератор Carbotech MS-H з максимальною продуктивністю 750 м³/год. Технологія проведення процесу інертизації виключала витрати азоту через ущільнення, трубопроводи або арматуру в системі. Тому було прийнято, що процес інертизації виконується без втрат азоту.

Завершення процесу інертизації визначалось за значенням концентрації азоту в газовому середовищі на виході з останньої групи вантажних танків (щодо рис. 3.4, 3.5, 3.5 п. 3.2 – перед елементом «Вихід газів»). Аналіз газового середовища виконувався за допомогою газового аналізатора Testo 380L.

Результати з визначення витрати азоту, необхідного для забезпечення процесу інертизації, а також тривалості проведення процесу інертизації, наведено в таблицях 4.1, 4.2.

Таблиця 4.1

Витрата азоту, необхідного для забезпечення процесу інертизації, м³

Вантажомісткість судна-газовозу, м ³	Схема інертизації		
	каскадна	паралельна	напівкаскадна
38646 (3 танка)	45000...47000	115000...120000	90000...95000
42427 (3 танка)	50000...53000	125000...130000	95000...100000
42563 (3 танка)	50000...53000	125000...130000	95000...100000

Таблиця 4.2

Тривалість проведення процесу інертизації, год

Вантажомісткість судна-газовоза, м ³	Схема інертизації		
	каскадна	паралельна	напівкаскадна
38646 (3 танка)	11...12	6...7	8...10
42427 (3 танка)	12...13	8...9	10...12
42563 (3 танка)	12...13	8...9	10...12

Якщо прийняти витрату азоту G_c та тривалість t_c процесу інертизації за каскадною схемою за базові значення, то відносні значення даних величин для всіх схем інертизації визначаються за виразами:

$$\left. \begin{aligned} & \text{— для каскадної схеми } \bar{G}_k = G_k / G_c = 1, \bar{t}_k = t_k / t_c = 1; \\ & \text{— для паралельної схеми } \bar{G}_n = G_n / G_c, \bar{t}_n = t_n / t_c; \\ & \text{— для напівкаскадної схеми } \bar{G}_h = G_h / G_c, \bar{t}_h = t_h / t_c. \end{aligned} \right\} \quad (4.1)$$

Відносні втрати енергії під час проведення процесу інертизації можливо оцінити за коефіцієнтом енергетичних витрат, що враховує відносні витрати інертного газу та відносну тривалість процесу інертизації

$$K_E = \bar{G} \cdot \bar{t}; \quad (4.2)$$

де \bar{G}, \bar{t} – відносні значення витрати азоту та тривалості інертизації, відповідно.

Збільшення коефіцієнту енергетичних витрат погіршує ефективність процесу інертизації. Це збільшення пов'язано або з підвищенням відносного значення витрати азоту \bar{G} , або зі збільшенням відносного значення тривалості інертизації \bar{t} . З показників \bar{G} та \bar{t} більш суттєвий вплив на ефективність процесу інертизації має відносна витрата азоту, що пов'язане з необхідністю додаткової експлуатації генератора інертних газів та (відповідно до його потужності) зростанням потужності судових дизель-генераторів і витрати палива на забезпечення їх роботи [166-168].

З урахуванням цих виразів (4.1), (4.2) отримаємо усереднені експериментальні значення, що наведені в таблицях 4.3-4.5.

Таблиця 4.3

Відносна витрата азоту, необхідного для забезпечення процесу інертизації

Вантажомісткість судна-газовоза, м ³	Схема інертизації		
	каскадна	паралельна	напівкаскадна
38646 (3 танки)	1	2,53	1,98
42427 (3 танки)	1	2,58	2,06
42563 (3 танки)	1	2,73	2,04

Таблиця 4.4

Відносна тривалість проведення процесу інертизації

Вантажомісткість судна-газовоза, м ³	Схема інертизації		
	каскадна	паралельна	напівкаскадна
38646 (3 танки)	1	0,55	0,75
42427 (3 танки)	1	0,52	0,69
42563 (3 танки)	1	0,48	0,71

Таблиця 4.5

Відносні витрати енергії під час проведення процесу інертизації

Вантажомісткість судна-газовоза, м ³	Схема інертизації		
	каскадна	паралельна	напівкаскадна
38646 (3 танки)	1	1,392	1,485
42427 (3 танки)	1	1,342	1,421
42563 (3 танки)	1	1,310	1,448

З метою кращої візуалізації, за результатами таблиць 4.3-4.5 побудовані діаграми, що подані на рис. 4.1.

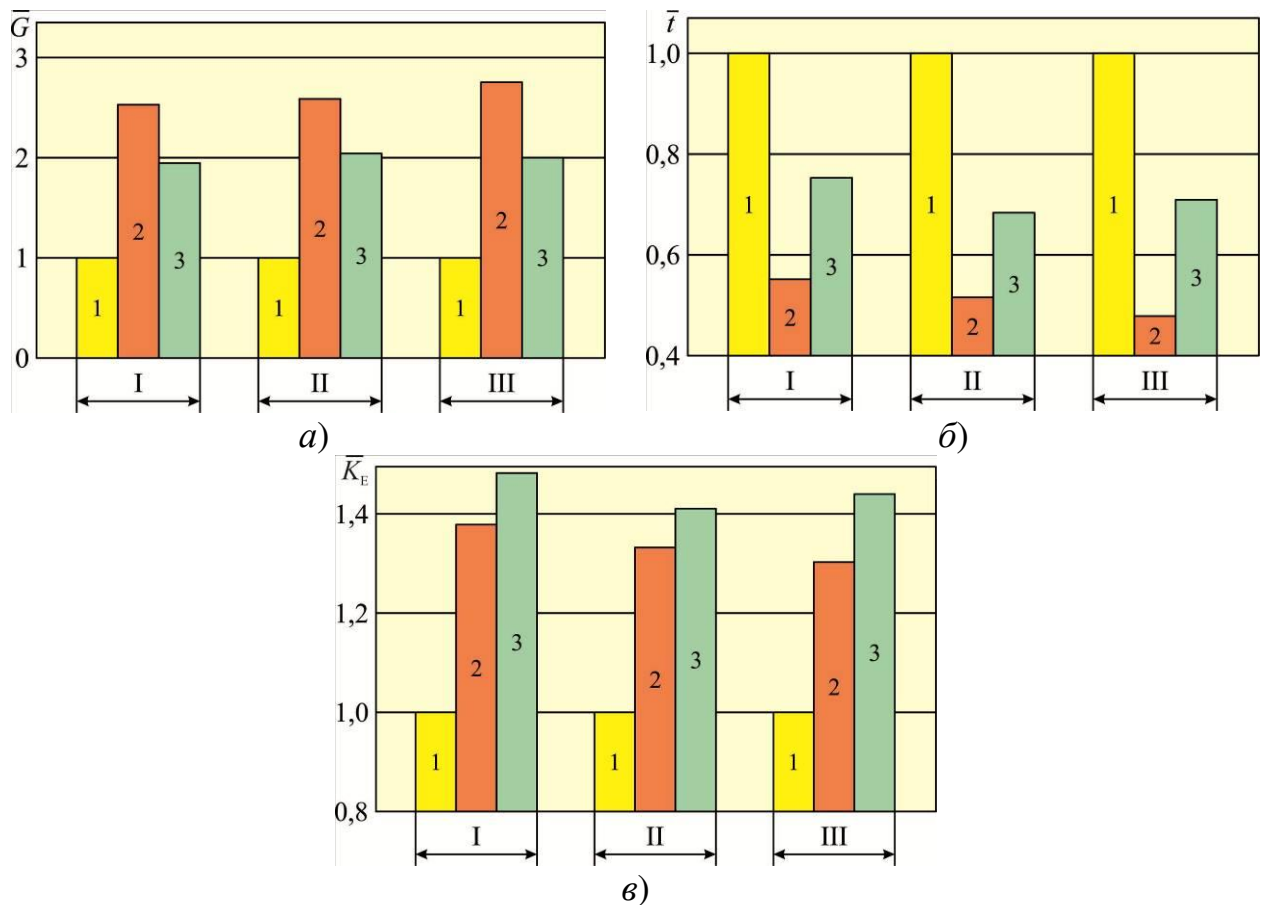


Рис. 4.1. Показники, що характеризують енергетичну ефективність процесу інертизації:

a – відносна витрата азоту; *б* – відносна тривалість; *в* – відносна витрата енергії; 1 – каскадна, 2 – паралельна, 3 – напівкаскадна схеми; вантажомісткість: I – 38646 м³; II – 42427 м³; III – 42563 м³

4.1.2. Результати досліджень на суднах-газовозах вантажомісткістю

50000...100000 м³

З метою збільшення масиву експериментальних даних та поширення висновків на судна іншої вантажомісткості, дослідження, послідовність виконання яких наведена в п. 4.1.1, проводились також на інших суднах. До цієї групи були віднесені судна-газовози з вантажомісткістю 72312 м³, 88248 м³, 88274 м³, 88302 м³.

Як генератор азоту на вказаних суднах використовувались генератори Carbotech MS-H, з продуктивністю до 850 м³/год. Аналіз газового середовища виконувався за допомогою газового аналізатора Testo380TL.

Результати з визначення витрати азоту, необхідного для забезпечення процесу інертизації, а також тривалості проведення процесу інертизації наведено в таблицях 4.6, 4.7.

Таблиця 4.6

Витрата азоту, необхідного для забезпечення процесу інертизації, м³

Вантажомісткість судна-газовоза, м ³	Схема інертизації		
	каскадна	паралельна	напівкаскадна
72312 (4 танки)	80000...85000	215000...225000	150000...160000
88248 (4 танки)	85000...90000	220000...230000	160000...170000
88274 (4 танки)	85000...90000	220000...230000	160000...170000
88302 (4 танки)	85000...90000	220000...230000	160000...170000

Таблиця 4.7

Тривалість проведення процесу інертизації, год

Вантажомісткість судна-газовоза, м ³	Схема інертизації		
	каскадна	паралельна	напівкаскадна
72312 (4 танки)	13...14	7...8	9...11
88248 (4 танки)	13...15	8...9	11...12
88274 (4 танки)	13...15	8...9	11...12
88302 (4 танки)	13...15	8...9	11...12

Відносні значення витрати азоту для каскадної $\overline{G_c}$, паралельної $\overline{G_p}$ та напівкаскадної схем $\overline{G_s}$, відносна тривалість процесу інертизації за цими схемами $\overline{t_c}$, $\overline{t_p}$ та $\overline{t_s}$, а також відносна ефективність процесу інертизації $\overline{K_E}$ визначались за виразами (4.1), (4.2). З урахуванням цих виразів, були отримані усереднені значення, що наведені в таблицях 4.8-4.10.

Таблиця 4.8

Відносна витрата азоту, необхідного для забезпечення процесу інертизації

Вантажомісткість судна-газовоза, м ³	Схема інертизації		
	каскадна	паралельна	напівкаскадна
72312 (4 танки)	1	2,03	1,68
88248 (4 танки)	1	2,08	1,78
88274 (4 танки)	1	2,11	1,82
88302 (4 танки)	1	2,19	1,76

Таблиця 4.9

Відносна тривалість проведення процесу інертизації

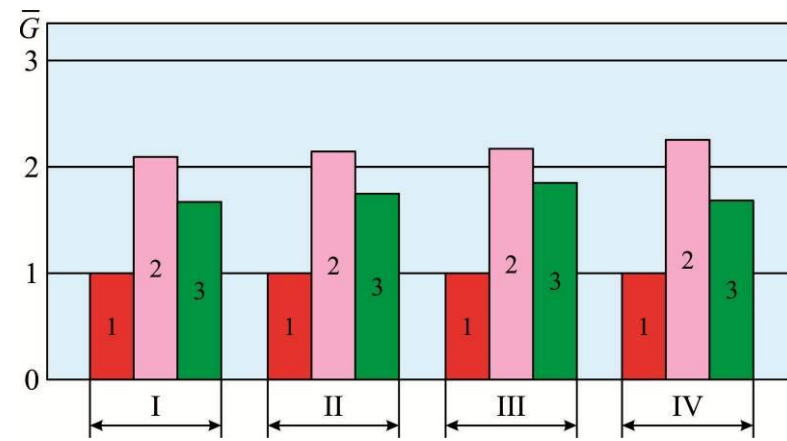
Вантажомісткість судна-газовозу, м ³	Схема інертизації		
	каскадна	паралельна	напівкаскадна
72312 (4 танки)	1	0,61	0,82
88248 (4 танки)	1	0,58	0,79
88274 (4 танки)	1	0,6	0,76
88302 (4 танки)	1	0,55	0,8

Таблиця 4.10

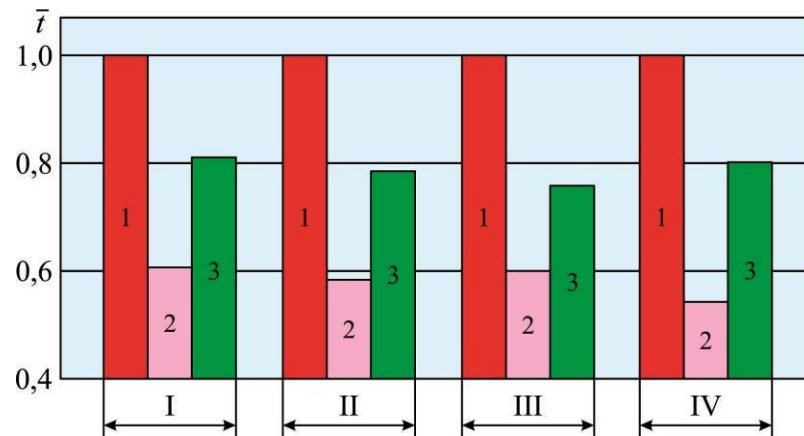
Відносні витрати енергії під час проведення процесу інертизації

Вантажомісткість судна-газовозу, м ³	Схема інертизації		
	каскадна	паралельна	напівкаскадна
72312 (4 танки)	1	1,238	1,378
88248 (4 танки)	1	1,206	1,406
88274 (4 танки)	1	1,266	1,383
88302 (4 танки)	1	1,205	1,408

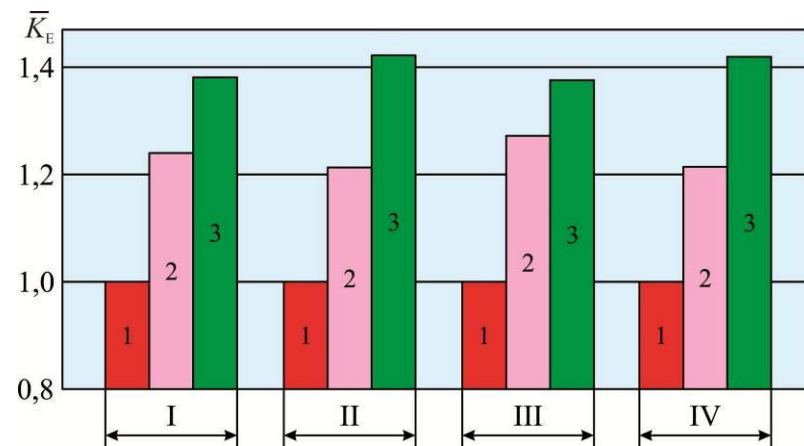
З метою кращої візуалізації, за результатами таблиць 4.8-4.10 побудовані діаграми, що подані на рис. 4.2.



а)



б)



в)

Рис. 4.2. Показники, що характеризують енергетичну ефективність процесу інертизації: а – відносна витрата азоту; б – відносна тривалість; в – відносні витрати енергії під час проведення процесу інертизації; 1 – каскадна, 2 – паралельна, 3 – напівкаскадна схеми; вантажомісткість: I – 72312 м³; II – 88248 м³; III – 88274 м³; IV – 88302 м³

4.1.3. Результати досліджень на суднах-газовозах з вантажомісткістю більше за 100000 м³

З метою збільшення масиву експериментальних даних та поширення висновків на судна іншої вантажомісткості, дослідження, послідовність виконання яких наведена в п. 3.5.1, проводились також на інших суднах. До цієї групи були віднесені судна-газовози з вантажомісткістю 145673 м³, 146817 м³, 162233 м³. Як генератор азоту використовувався генератор Carbotech Corper-DX, що забезпечує додаткове осушення азоту, з продуктивністю до 1300 м³/год. Аналіз газового середовища виконувався за допомогою газового аналізатора Testo350XL.

Результати з визначення витрати азоту, необхідного для забезпечення процесу інертизації, а також тривалості проведення процесу інертизації наведено в таблицях 4.11, 4.12.

Таблиця 4.11

Витрата азоту, необхідного для забезпечення процесу інертизації, м³

Вантажомісткість судна-газовоза, м ³	Схема інертизації		
	каскадна	паралельна	напівкаскадна
145673 (5 танків)	160000...170000	240000...260000	200000...220000
146817 (5 танків)	160000...170000	240000...260000	200000...220000
162233 (5 танків)	180000...200000	260000...280000	220000...240000

Таблиця 4.12

Тривалість проведення процесу інертизації, год

Вантажомісткість судна-газовоза, м ³	Схема інертизації		
	каскадна	паралельна	напівкаскадна
145673 (5 танків)	13...15	7...8	9...10
146817 (5 танків)	13...15	7...8	9...10
162233 (5 танків)	14...15	8...9	9...10

Відносні значення витрати азоту для каскадної \overline{G}_k , паралельної \overline{G}_n та напівкаскадної схем \overline{G}_n , відносна тривалість процесу інертизації за цими схемами \overline{t}_k , \overline{t}_n та \overline{t}_n , а також відносні витрати енергії під час проведення процесу інертизації \overline{K}_E визначались за виразами, що наведені в п. 4.1.1. З урахуванням цих виразів, були отримані усереднені експериментальні значення, що наведені в таблицях 4.13-4.15.

Таблиця 4.13

Відносна витрата азоту, необхідного для забезпечення процесу інертизації

Вантажомісткість судна-газовоза, м ³	Схема інертизації		
	каскадна	паралельна	напівкаскадна
145673 (5 танків)	1	1,44	1,38
146817 (5 танків)	1	1,46	1,37
162233 (5 танків)	1	1,51	1,41

Таблиця 4.14

Відносна тривалість проведення процесу інертизації

Вантажомісткість судна-газовоза, м ³	Схема інертизації		
	каскадна	паралельна	напівкаскадна
145673 (5 танків)	1	0,59	0,82
146817 (5 танків)	1	0,61	0,86
162233 (5 танків)	1	0,57	0,79

Таблиця 4.15

Відносні витрати енергії під час проведення процесу інертизації

Вантажомісткість судна-газовоза, м ³	Схема інертизації		
	каскадна	паралельна	напівкаскадна
145673 (5 танків)	1	0,850	1,132
146817 (5 танків)	1	0,891	1,178
162233 (5 танків)	1	0,861	1,114

З метою кращої візуалізації, за результатами таблиць 4.13-4.15 побудовані діаграми, що подані на рис. 4.3.

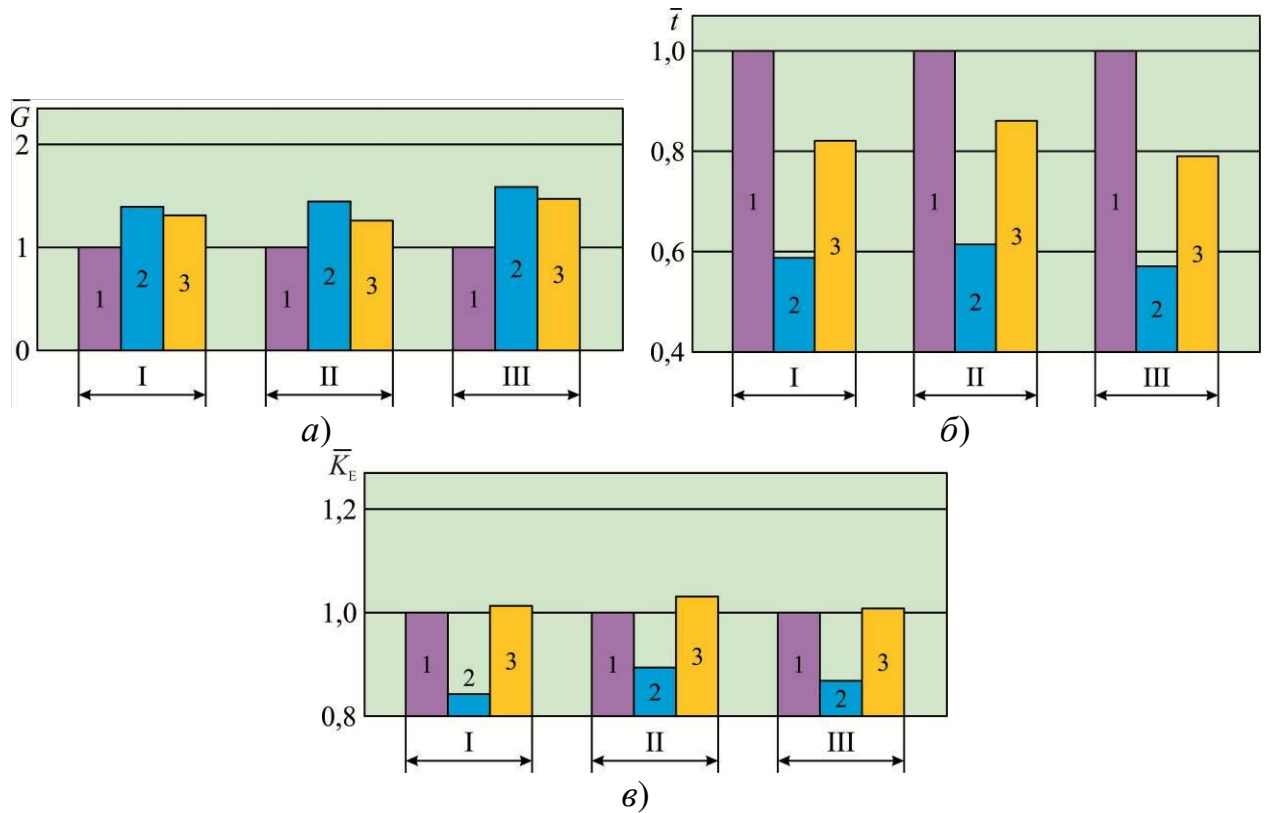


Рис. 4.3. Показники, що характеризують енергетичну ефективність процесу інертизації:

a – відносна витрата азоту; *б* – відносна тривалість; *в* – відносна витрата енергії; 1 – каскадна, 2 – паралельна, 3 – напівкаскадна схеми; вантажомісткість: I – 145673 м³; II – 146817 м³; III – 162233 м³

4.1.4. Аналіз результатів з визначення витрати азоту та тривалості процесу інертизації для суден-газовозів різної вантажомісткості

Інертизація вантажних танків суден-газовозів є однією зі складових, які гарантують безпечну експлуатацію суден такого класу [169, 170]. Технологія процесу інертизації ідентична на всіх суднах-газовозах, а також під час транспортування будь-яких вантажів. Тому результати досліджень, які

отримані на одному судні чи групі суден, можуть бути імплементовані на всі судна такого класу.

Водночас проведені дослідження характеризуються наступною дилемою. З одного боку, кожен вантаж, який перевозиться суднами-газовозами має свої фізичні характеристики. З іншого боку, свої геометричні характеристики мають вантажні танки різних суден. Це призводить до того, що для того самого судна під час транспортування різних вантажів змінюється гідравлічний опір, який необхідно подолати для забезпечення інертизації. Таким чином, схема інертизації, рекомендована для одного вантажу, може бути менш ефективною для іншого. З іншого боку, зазвичай, судна-газовози забезпечують перевезення вантажів відповідно до довгострокових фрахтових контрактів. При цьому здійснюється перевезення одного і того ж вантажу протягом декількох рейсів (кількість яких може досягати 10, а в деяких випадках перевищувати 20). Це підвищує потребу в результатах виконаних досліджень. Крім того, існують «серії суден» із практично однаковими характеристиками, причому експлуатація цих суден може виконуватись з однаковим фрахтовим завданням. Таким чином, рекомендації, розроблені для одного судна, можуть ефективно використовуватися на інших суднах, які перевозять такий самий вантаж між такими самими портами.

Також визначимо, що всі дослідження з інертизації вантажних танків виконували або під час баластових переходів судна, або в порту розвантаження. При цьому контролювалися та підтримувалися у необхідному діапазоні всі основні параметри роботи головного та допоміжних двигунів, параметри в системах, які забезпечують їхнє функціонування, всі основні параметри в системі генерації інертних газів, а також показники, що характеризують екологічність роботи суднової енергетичної установки, а саме емісія оксидів сірки, азоту та вуглецю. Крім того, постійно контролювався крен та диферент судна, а також його стійкість.

Усі дослідження виконувались з виконанням вимог таких міжнародних морських документів:

- International Maritime Dangerous Goods Code;
- Equipment of Ships Carrying Liquefied Gases in Bulk;
- International Safety Management Code [145, 153, 154]

Узагальнені значення відносної витрати азоту та відносної тривалості інертизації для різних груп суден-газовозів наведено у таблиці 4.16.

Таблиця 4.16

Порівняння схем інертизації вантажних танків суден-газовозів під час використання азоту

Вантажомісткість, м ³	Відносна витрата азоту, необхідного для забезпечення процесу інертизації		
	каскадна	паралельна	напівкаскадна
I – менше за 50000	1,0	2,53...2,73	1,98...2,06
II – 50000...100000	1,0	2,03...2,19	1,68...1,82
III – більше за 100000	1,0	1,44...1,51	1,37...1,41
Відносна тривалість проведення процесу інертизації			
I – менше за 50000	1,0	0,48...0,55	0,69...0,75
II – 50000...100000	1,0	0,55...0,61	0,76...0,82
III – більше за 100000	1,0	0,57...0,61	0,79...0,86
Відносні витрати енергії під час проведення процесу інертизації			
I – менше за 50000	1,0	1,310...1,392	1,421...1,485
II – 50000...100000	1,0	1,205...1,238	1,378...1,408
III – більше за 100000	1,0	0,850...0,891	1,114...1,132

З метою кращої візуалізації, за результатами таблиці 4.16 побудовані діаграми, що подані на рис. 4.4.

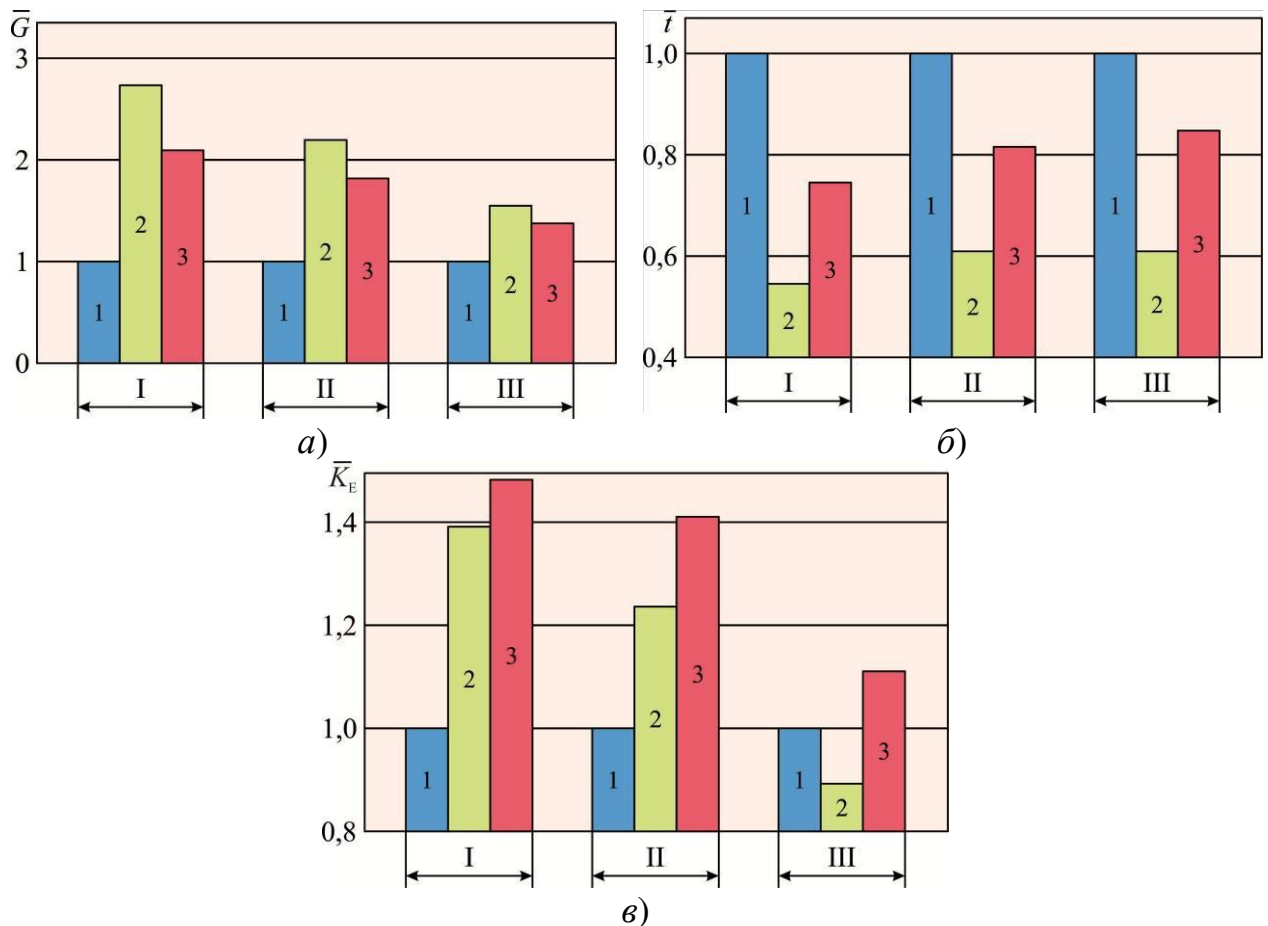


Рис. 4.3. Показники, що характеризують енергетичну ефективність процесу інертизації:

а – відносна витрата азоту; *б* – відносна тривалість; *в* – відносна витрата енергії; 1 – каскадна, 2 – паралельна, 3 – напівкаскадна схеми; вантажомісткість: I – менше за 50000 м³; II – 50000...100000 м³; III – більше за 100000 м³

Таким чином, експериментально встановлено, що:

- для суден вантажомісткістю до 100000 м³ найбільш оптимальною схемою інертизації є каскадна, далі слідують паралельна та напівкаскадна;
- для суден вантажомісткістю більш за 100000 м³ найбільш оптимальною схемою інертизації є паралельна, далі слідують каскадна та напівкаскадна.

Вибір схеми інертизації залежить від рейсового завдання, вимог берегової адміністрації та можливостей порту-розвантаження щодо забезпечення судна азотом, а також характеристик суднової системи генерації інертних газів.

4.2. Аналіз екологічності методів інертизації вантажних танків суден-газовозів

Екологічні показники морських суден та їх енергетичних установок визначаються насамперед рівнем очищення суднових вод, що містять нафту, та емісією шкідливих речовин з випускними газами, вміст деяких компонентів яких, а також вміст сірки в паливі регламентується вимогами МАРПОЛ [171-175].

З метою обмеження негативного впливу вод, що містять нафту, їх концентрація під час скидання за борт на повинна перевищувати 15 млн^{-1} , при цьому безпосередньо скидання подібних вод можливе лише поза екологічними районами та на відстані, що перебільшує 12 морських миль від берега [176-178].

Викиди оксидів азоту NO_x , що утворюються під час згоряння палива в циліндрі дизеля (якими є паливні та термічні NO_x) та у газовипускному тракті (якими є швидкі NO_x) регламентуються залежно від року побудови судна та частоти обертання дизеля. Ці умови обговорюються рівнями Tier I (що відноситься до суден, які побудовані з 2000 р. по 01.01.2011 р.), Tier II (що відноситься до суден, які побудовані з 01.01.2011 р. по 01.01.2016 р.), Tier III (що відноситься до суден, які побудовані після 01.01.2016 р.), відповідно до яких емісія оксидів азоту з випускними газами знаходиться в межах $9,8 \dots 17,0 \text{ кг}/(\text{кВт} \cdot \text{год})$, $7,7 \dots 14,4 \text{ кг}/(\text{кВт} \cdot \text{год})$, $2,0 \dots 3,4 \text{ кг}/(\text{кВт} \cdot \text{год})$ [179, 180]. Досягнення вимог, що висуваються Tier I та Tier II, є можливим за рахунок вдосконалення робочого процесу суднових дизелів, оптимізації конструкції паливної апаратури високого тиску та закону подачі палива, використання альтернативних видів палива [181-184]. Досягнення вимог Tier III можливе лише через використання додаткових технологій очищення випускних газів (селективного або неселективного очищення), а також рециркуляції випускних газів [185-188].

Обмеження викидів оксидів сірки SO_x , які також утворюються під час згоряння палива, регламентується не їх вмістом в загальному об'ємі випускних газів, а вмістом сірки в паливі. Ця величина відповідно вимог МАРПОЛ не повинна перевищувати 0,1 % за масою під час експлуатації суднових дизелів у спеціальних екологічних районах контролю емісії сірки (Sulphur Emission Control Areas – SECAs) та становити не більш за 0,5 % за масою під час експлуатації суднових дизелів поза районами SECAs [189-191]. Перебільшення вмісту сірки в паливі дозволяється лише за умови наявності на судні спеціальних очисних пристроїв (найчастіше скрубєрів), у яких здійснюється фізична або хімічна дія на потік випускних газів з метою нейтралізації сполук, що містять сірку [192, 193].

Одночасно з прагненням зниження викидів оксидів азоту NO_x та сірки SO_x до енергетичних установок суден морського та внутрішнього водного транспорту ставиться завдання декарбонізації палива. Передусім це пов'язано з тим, що до складу всіх найбільш розповсюджених палив (рідкого, нафтового походження, нафтового чи природного газу, палив на основі спиртів та ефірів, а також палив з рослинних речовин) входить вуглець. Його вміст у різних за складом та походженням паливах коливається в межах 60...85 % за масою. Під час згоряння вуглецевих палив утворюється оксид вуглецю CO (який разом з NO_x та SO_x є токсичним газом) та діоксид вуглецю CO_2 (який відноситься до групи парникових газів та потрапляння якого до атмосфери сприяє руйнування озонового шару).

У зв'язку з прийняттям Протоколу про внесення поправок до Додатка VI до МАРПОЛ та Резолюції 8 Конференції з викидів CO_2 із суден у 1997 р. було вирішено, що ІМО має дослідити викиди парникових газів із суден та розробити життєздатні стратегії щодо скорочення їх викидів. У 2000 р. ІМО опублікувала перший звіт, присвячений визначенню заходів щодо скорочення викидів парникових газів та їх потенціалу, який підготував дорожню карту для розробки та реалізації майбутніх стратегій ІМО щодо скорочення викидів парникових газів. На Асамблеї ІМО, що відбулася у

2003 р., було прийнято резолюцію А.963(23), у якій Комітету із захисту морського середовища було доручено визначити та розробити механізми, необхідні для обмеження або скорочення викидів парникових газів у результаті міжнародного судноплавства. Згодом ІМО прийняла поправки до Додатка VI МАРПОЛ, які додали нову Главу 4 до Додатка, щоб зробити індекс енергоефективності конструкції (EEDI) обов'язковим у 2011 р. У 2016 р. МЕРС 70 прийняв Дорожню карту для розробки всеосяжної стратегії ІМО щодо скорочення викидів парникових газів з суден. Після прийняття Дорожньої карти було створено Міжсесійну робочу групу з парникових газів для початку обговорення розробки стратегії ІМО щодо парникових газів, а на сесії МЕРС 72 у 2018 р. було прийнято Початкову стратегію ІМО щодо скорочення викидів парникових газів із суден. У «дорожній карті» та початковій стратегії ІМО у розділах, що стосуються парникових газів, була чітко визначена вирішальна дата прийняття переглянутої стратегії ІМО в щодо парникових газів – весна 2023 р. Таким чином, МЕРС 77, що відбулася у 2021 році, ініціювала перегляд Початкової стратегії ІМО щодо парникових газів з метою її прийняття на МЕРС 80. Після тривалих обговорень Стратегію ІМО щодо скорочення викидів парникових газів із суден на 2023 р. було остаточно прийнято.

Порівняно з початковою Стратегією ІМО щодо скорочення викидів парникових газів рівень амбіцій значно зріс, демонструючи твердий намір декарбонізувати міжнародне судноплавство. Зокрема, як нові цілі були введені енергетичні, паливні та технологічні завдання з досягнення нульових або близьких до нуля викидів парникових газів до 2030 р., а як показник досягнення мети ІМО на 2050 р. були додані контрольні точки сумарних викидів парникових газів на 2030 та 2040 рр. Встановлення цілей ІМО на 2030 р., до якого залишилося близько п'яти років, буде пов'язане з вирішення великих технічних, економічних та політичних завдань, незважаючи на технологію декарбонізації міжнародного судноплавства, яка за короткий період зросла до значних масштабів.

Як короткотривалий захід для досягнення цільового показника ІМО, МЕРС 76 прийняв поправки до Додатка VI до МАРПОЛ, що стосуються вуглецевої місткості суден, що експлуатуються, у вигляді резолюції МЕРС.328(76) у 2021 р. для реалізації правила «Індикатор вуглецевої інтенсивності» (Emission intensity indicator – СІ). МЕРС 78 прийняв технічне керівництво для полегшення його реалізації, включаючи методологію розрахунку рейтингів СІ, критерії для конкретних суден та корекційні коефіцієнти та встановив план завершення огляду суден щодо визначення СІ до 1 січня 2026 р.

Екологічність процесів інертизації вантажних танків суден-газовозів може бути оцінена через їх негативний вплив на довкілля. Пов'язано це з двома факторами:

- 1) утворенням вуглекислого газу CO_2 під час спалювання палива в судових допоміжних двигунах, які забезпечують своєю потужністю роботу генератора інертних газів;
- 2) викидом в атмосферу залишків ЗПГ, що транспортувався як вантаж та видаляється з вантажних танків під час їх інертизації.

Утворення вуглекислого газу CO_2 пов'язано з окисленням та подальшим згорянням вуглецю, що входить до складу палива нафтового походження. Об'ємна кількість вуглекислого газу CO_2 (як й інших газів, що складають загальний об'єм продуктів згоряння – сірчистого ангідриду SO_2 , водяної пари H_2O , кисню O_2 , азоту N_2) може бути визначена з термодинамічних рівнянь процесу згоряння палива з урахуванням необхідної для горіння кількості кисню. Через значення об'єму вуглекислого газу CO_2 , що утворюється під час згоряння 1 кг палива нафтового походження, у подальшому (з урахуванням потужності генератора інертних газів, часу, необхідного для проведення процесу інертизації вантажних танків та характеристик палива) можливо розрахувати кількість вуглекислого газу CO_2 , що потрапляє в атмосферу під час інертизації. Аналітичні вирази для визначення цих показників наведені в таблиці 4.17.

Таблиця 4.17

Послідовність визначення кількості вуглекислого газу, що потрапляє в атмосферу під час інертизації вантажних танків

№ з/п	Показник	Позначення	Розмірність	Спосіб визначення
1	2	3	4	5
1.	Склад палива: вуглець водень сірка кисень азот зола вода	C^p H^p S^p O^p N^p A^p W^p C^p	% % % % % % %	За характеристиками палива відповідно до bunker list
2.	Коефіцієнт надлишку повітря	α		За даними випробувань
3.	Вміст вологи в повітрі	W_B	кг/кг	
4.	Об'єм повітря, теоретично необхідний для згоряння 1 кг палива	V_{Π}^0	м ³ /кг	$0,0889C^p + 0,265H^p + 0,0333(S^p - O^p)$
5.	Об'єми газів, що утворюються під час згоряння 1 кг палива: вуглекислого сірчистого ангідриду водяної пари азоту кисню	V_{CO_2} V_{SO_2} V_{H_2O} V_{N_2} V_{O_2}	м ³ /кг м ³ /кг м ³ /кг м ³ /кг м ³ /кг	$0,0186C^p$ $0,00698S^p$ $0,111H^p + 0,0124W^p + 1,61\alpha w_{\Pi} V_{\Pi}^0$ $0,008N^p + 0,79\alpha V_{\Pi}^0$ $0,21(\alpha - 1)V_{\Pi}^0$

Закінчення таблиці 4.17

1	2	3	4	5
6.	Сумарний об'єм продуктів згоряння	V_r	м ³ /кг	$V_{CO_2} + V_{SO_2} + V_{H_2O} + V_{N_2} + V_{O_2}$
7.	Питома витрата палива судновим дизель-генератором	b_e	$\frac{\text{кг}}{\text{кВт} \cdot \text{г}}$	За даними випробувань
8.	Потужність генератора інертних газів	$N_{ГГ}$	кВт	
9.	Час роботи генератора інертних газів	$t_{ГГ}$	год	
10.	Об'єм вуглекислого газу, який утворюється за час, що необхідний для процесу інертизації	$V_{CO_2}^{ГГ}$	м ³	$V_{CO_2} \cdot b_e \cdot N_{ГГ} \cdot t_{ГГ}$
11.	Сумарний об'єм продуктів згоряння, який утворюється за час, що необхідний для процесу інертизації	$V_r^{ГГ}$	м ³	$V_r \cdot b_e \cdot N_{ГГ} \cdot t_{ГГ}$

Виконання розрахунків за наведеною послідовністю дозволяє виділити із загального об'єму оксиду вуглецю CO_2 , що утворюється під час експлуатації суднових дизель-генераторів, саме ту частину, утворення якої пов'язано з забезпеченням необхідної потужності генератора інертних газів.

Визначення кількості оксиду вуглецю CO_2 , потрапляння в атмосферу якого пов'язане із забезпеченням процесу інертизації, можливе також експериментальним шляхом, але для цього потрібне встановлення витратоміра та газоаналізатора у випускний тракт суднових дизель-генераторів, а також утворення експлуатаційних умов, за якими потужність дизель-генератора споживалась би лише генератором інертних газів.

Дослідження щодо визначення екологічності процесу інертизації виконувались на суднах-газовозах вантажомісткістю 38646 м³, 42427 м³, 42563 м³, 72312 м³, 88248 м³, 88274 м³, 88302 м³, 145673 м³, 146817 м³, 162233 м³, які аналогічно з дослідженнями, послідовність яких наведена в п. 4.1, були об'єднані в групи менш за 50000 м³, 50000...100000 м³, більш за 100000 м³.

Загальний об'єм оксиду вуглецю CO₂, потрапляння в атмосферу якого пов'язане із забезпеченням процесу інертизації, розраховувався для кожного з суден для каскадної, паралельної та напівкаскадної схем. Потужність генератора інертних газів та час інертизації вантажних танків визначався під час дослідження енергетичної ефективності методів інертизації вантажних танків суден-газовозів – п. 4.1.

У зв'язку з тривалістю експериментальних досліджень (виконання яких здійснювалось під час декількох вантажних операцій) експлуатація суднових дизель-генераторів виконувалась на різних сортах палива, але елементарний склад цих палив (відносно вмісту вуглецю, кисню та водню) збігався. Тому під час розрахунків приймалися середні значення цих показників. Також рівними для кожного з розрахунків приймалися коефіцієнт надлишку повітря, вміст вологи в повітрі та питома ефективна витрата палива суднових дизель-генераторів.

Значення потужності $N_{ГГ}$, кВт, та часу роботи t , год, генератора інертних газів визначались під час проведення процесу інертизації. Об'єм вуглекислого газу, який утворюється за час інертизації, розраховувався відповідно до послідовності, що наведена в таблиці 4.17.

Результати вимірювань та розрахунків наведені в таблиці 4.18.

За результатами таблиці 4.18 побудовані діаграми (рис. 4.4-4.6), що відображають зміну основних показників системи інертних газів, що впливають на екологічність процесу інертизації вантажних танків.

Таблиця 4.18

Визначення екологічної ефективності процесу інертизації вантажних танків суден-газовозів

Ванта- жоміст- кість, м ³	Потужність генератора інертних газів, $N_{ГГ}$, кВт			Час роботи генератора інертних газів, t , год			Об'єм вуглекислого газу, який утворюється за час інертизації			Відносний коефіцієнт викидів CO ₂		
	каскадна	пара- лельна	напів- каскадна	каскадна	пара- лельна	напів- каскадна	каскадна	пара- лельна	напів- каскадна	каскадна	пара- лельна	напів- каскадна
38646	450	950	620	9,2	5,4	7,7	1263,3	1565,4	1456,7	1	1,239	1,153
42427	450	960	650	11,3	6,5	8,7	1551,6	1904,1	1725,5	1	1,227	1,112
42563	450	960	650	11,4	6,6	8,8	1565,4	1933,3	1745,4	1	1,235	1,115
72312	620	1320	1130	13,3	7,8	8,6	2516,2	3141,7	2965,3	1	1,249	1,179
88248	720	1420	1180	13,8	8,6	9,7	3031,8	3726,3	3492,6	1	1,229	1,152
88274	720	1420	1180	13,8	8,5	9,8	3031,8	3683,0	3528,6	1	1,215	1,164
88302	720	1420	1180	13,7	8,7	9,8	3009,9	3769,7	3528,6	1	1,252	1,172
145673	1150	2180	1840	13,4	8,4	9,6	4702,2	5587,7	5389,9	1	1,188	1,146
146817	1150	2180	1840	13,5	8,8	10,2	4737,2	5853,7	5726,8	1	1,236	1,209
162233	1150	2180	1840	14,2	8,9	10,3	4982,9	5920,3	5782,9	1	1,188	1,161

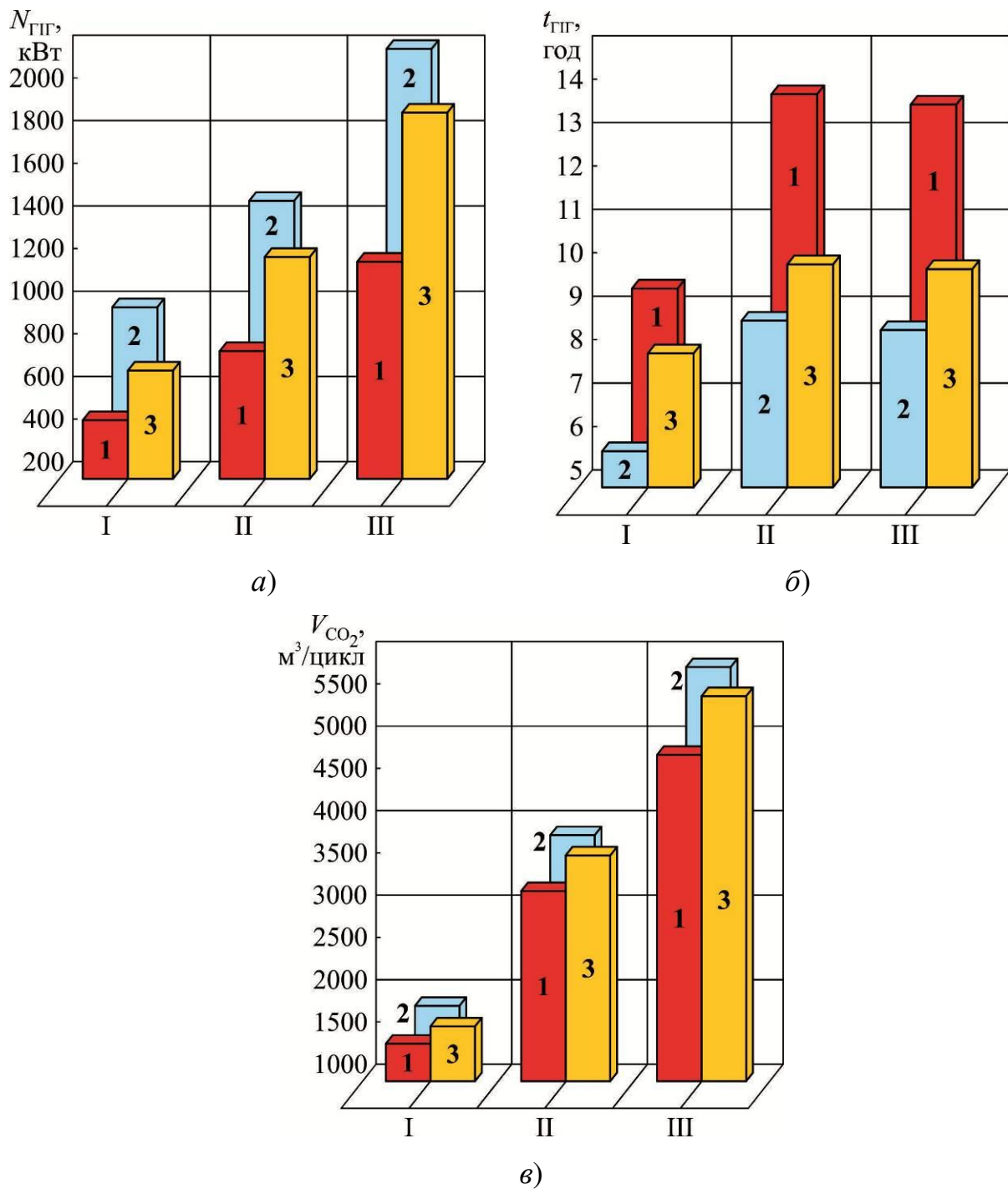


Рис. 4.4. Залежність показників роботи системи інертизації для різних схем подачі азоту у вантажні танки:

1 – каскадна, 2 – паралельна, 3 – напів каскадна; вантажомісткість:

I – менше 50000 м³, II – 50000...100000 м³, III – більше за 100000 м³;

а – потужність генератора інертних газів, $N_{ГГ}$, кВт; б – час роботи генератора інертних газів, t , год; в – об'єм вуглекислого газу, який утворюється за час інертизації, м³/цикл

З метою оцінки екологічної ефективності процесу інертизації був запропонований відносний коефіцієнт викидів CO_2 :

$$\overline{K}_{\text{CO}_2} = \frac{V_{\text{CO}_2}^{\text{ін}}}{V_{\text{CO}_2}^{\text{к}}}; \quad (4.3)$$

де $V_{\text{CO}_2}^{\text{ін}}$ – об’єм оксиду вуглецю CO_2 , що утворюється під час інертизації за однією зі схем (каскадною, паралельною, напівкаскадною);

$V_{\text{CO}_2}^{\text{к}}$ – об’єм оксиду вуглецю CO_2 , що утворюється під час інертизації за каскадною схемою.

Розрахункові значення цього коефіцієнту наведені в таблиці 4.18. Візуалізація значень $\overline{K}_{\text{CO}_2}$ для різних схем подачі азоту у вантажні танки надані у вигляді рис. 4.5-4.79.

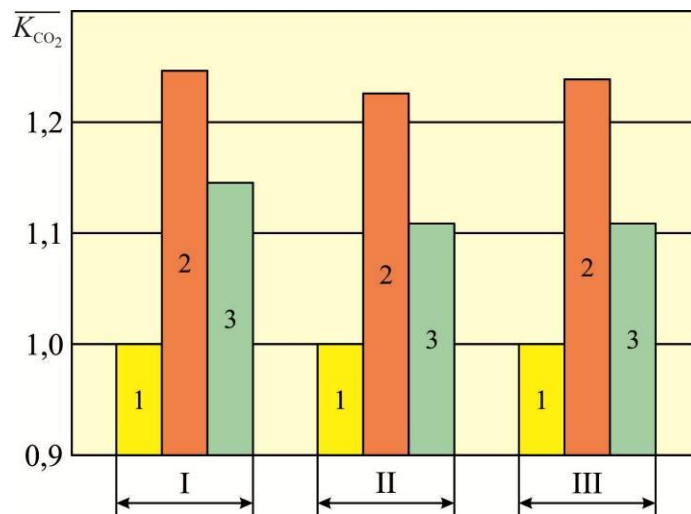


Рис. 4.5. Екологічна ефективність процесу інертизації вантажних танків суден-газовозів вантажомісткістю менше 50000 м³:

1 – каскадна, 2 – паралельна, 3 – напівкаскадна схеми;
вантажомісткість: І – 38646 м³; ІІ – 42427 м³; ІІІ – 42563 м³

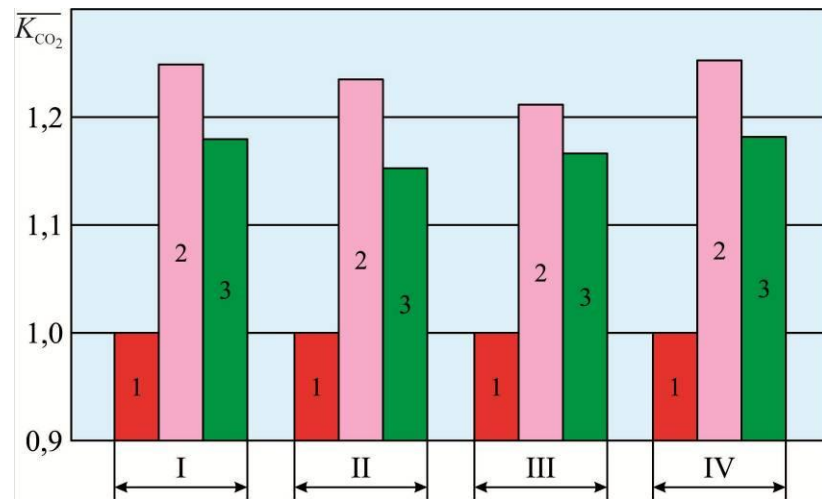


Рис. 4.6. Екологічна ефективність процесу інертизації вантажних танків суден-газовозів вантажомісткістю 50000...100000 м³:
1 – каскадна, 2 – паралельна, 3 – напівкаскадна схеми;
вантажомісткість: I – 72312 м³; II – 88248 м³; III – 88274 м³; IV – 88302 м³

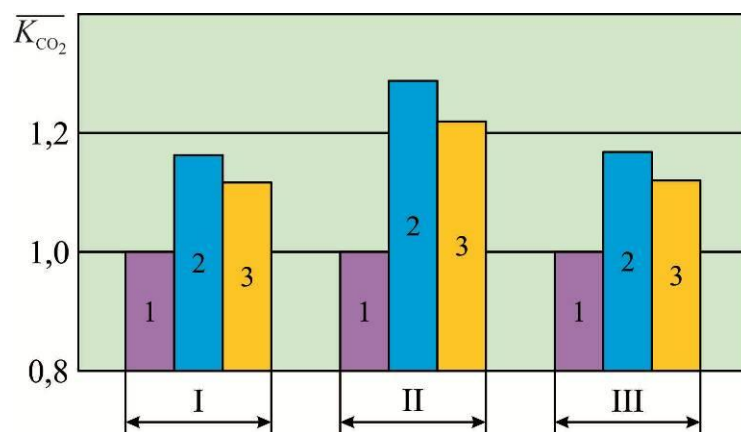


Рис. 4.7. Екологічна ефективність процесу інертизації вантажних танків суден-газовозів вантажомісткістю більше 100000 м³:
1 – каскадна, 2 – паралельна, 3 – напівкаскадна схеми;
вантажомісткість: I – 145673 м³; II – 146817 м³; III – 162233 м³

Порівняння схем подачі азоту у вантажні танки з метою визначення їх екологічної ефективності було виконано відносно каскадної схеми інертизації, яка характеризується найменшим відносним коефіцієнтом викидів CO₂. (відповідно до таблиці 4.18 та рис. 4.7-4.9).

При цьому розраховувались:

- відносне збільшення потужності генератора інертних газів

$$\overline{N_{\text{ГГ}}} = \frac{N_{\text{ГГ}}^{\text{іг}}}{N_{\text{ГГ}}^{\text{к}}}; \quad (4.4)$$

- відносне зменшення часу роботи генератора інертних газів

$$\overline{t_{\text{ГГ}}} = \frac{t_{\text{ГГ}}^{\text{іг}}}{t_{\text{ГГ}}^{\text{к}}}; \quad (4.5)$$

- відносне збільшення об'єму діоксидів вуглецю, що утворюється під час інертизації

$$\overline{V_{\text{CO}_2}} = \frac{V_{\text{CO}_2}^{\text{іг}}}{V_{\text{CO}_2}^{\text{к}}}. \quad (4.6)$$

У виразах (4.4)-(4.6) $N_{\text{ГГ}}^{\text{іг}}, t_{\text{ГГ}}^{\text{іг}}, V_{\text{CO}_2}^{\text{іг}}$ – потужність генератора інертних газів, час роботи генератора інертних газів, об'єм оксиду вуглецю, що утворюється під час інертизації за однією зі схем (каскадною, паралельною, напівкаскадною);

$N_{\text{ГГ}}^{\text{к}}, t_{\text{ГГ}}^{\text{к}}, V_{\text{CO}_2}^{\text{к}}$ – ті самі показники під час інертизації за каскадною схемою.

Визначення значень $\overline{N_{\text{ГГ}}}, \overline{t_{\text{ГГ}}}, \overline{V_{\text{CO}_2}}$ виконувалось для суден газовозів вантажомісткістю 38646 м³, 88248 м³ та 145673 м³. Результати розрахунків узагальнені у вигляді таблиці 4.19.

Таблиця 4.19

Порівняння показників, що характеризують екологічність процесу інертизації вантажних танків суден-газовозів

Показник	Характеристика судна-газовоза та схема інертизації вантажних танків		
	каскадна	паралельна	напівкаскадна
	судно-газовоз вантажомісткістю 38646 м ³		
Відносне збільшення потужності генератора азоту	1	2,11	1,38
Відносне зменшення часу роботи генератора інертних газів	1	1,70	1,19
Відносне збільшення об'єму діоксидів вуглецю	1	1,24	1,15
	судно-газовоз вантажомісткістю 88248 м ³		
Відносне збільшення потужності генератора азоту	1	1,97	1,64
Відносне зменшення часу роботи генератора інертних газів	1	1,60	1,42
Відносне збільшення об'єму діоксидів вуглецю	1	1,23	1,15
	судно газовоз вантажомісткістю 145673 м ³		
Відносне збільшення потужності генератора азоту	1	1,89	1,60
Відносне зменшення часу роботи генератора інертних газів	1	1,59	1,39
Відносно збільшення об'єму діоксидів вуглецю	1	1,19	1,16

За результатами таблиці 4.19 побудовані діаграми, що надані на рис. 4.8.

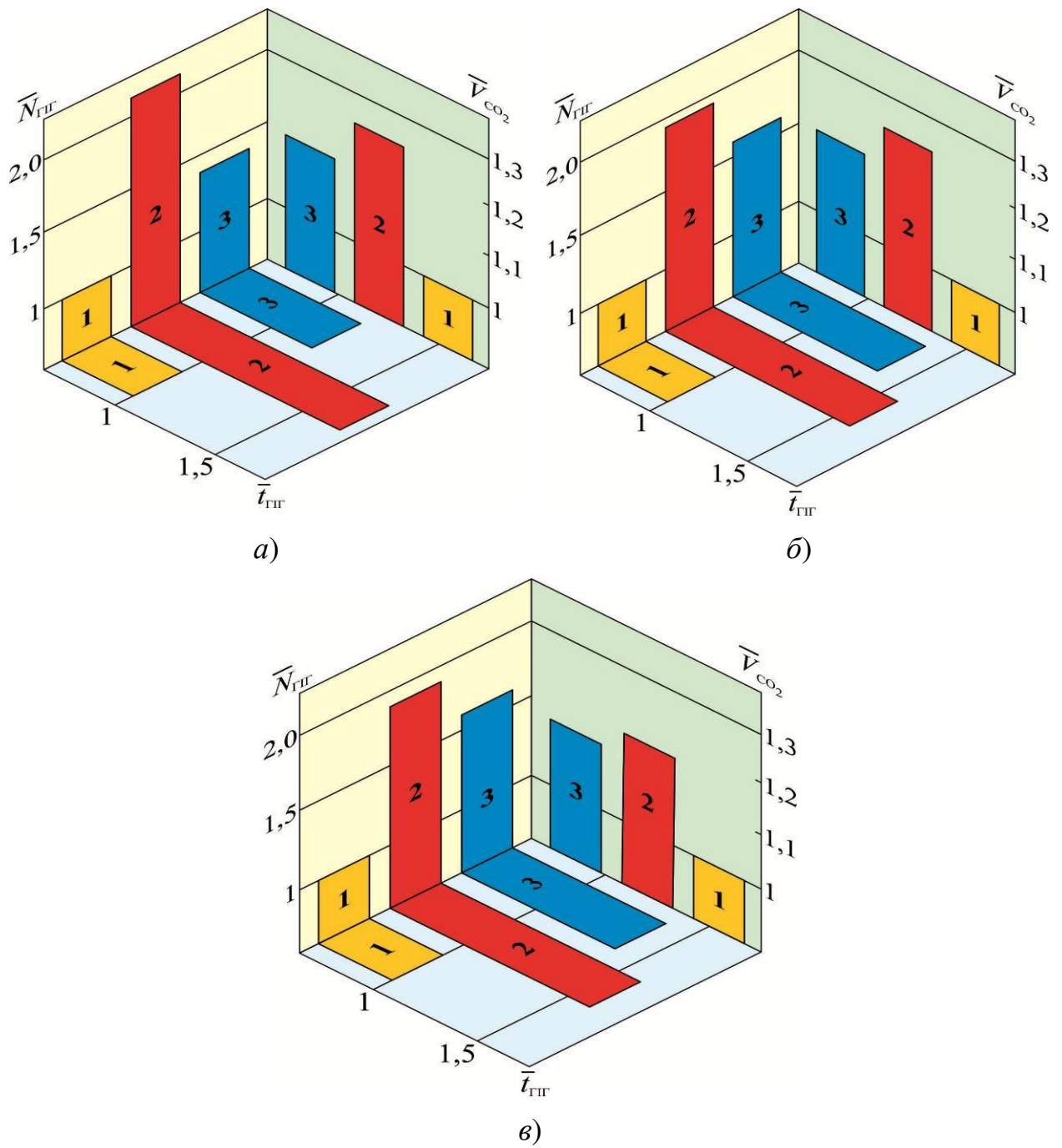


Рис. 4.8. Порівняння показників, що характеризують екологічність процесу інертизації вантажних танків суден-газовозів:

1 – каскадна, 2 – паралельна, 3 – напівкаскадна схеми;
вантажомісткість: I – 38646 м³; II – 88248 м³; III – 145673 м³

4.3. Висновки за розділом 4

Як результат досліджень, наведених в розділі 4, визначимо наступне.

1. Енергетичну ефективність процесу інертизації вантажних танків суден-газовозів доцільно оцінювати за значеннями відносної витрати азоту (як інертного газу), відносної тривалість інертизації, відносної витрати енергії на роботи допоміжного обладнання, яке використовується для забезпечення інертизації. Експериментальні дослідження, які виконувались на суднах-газовозах вантажомісткістю 38646 м³, 42427 м³, 42563 м³, 72312 м³, 88248 м³, 88274 м³, 88302 м³, 145673 м³, 146817 м³, 162233 м³ визначили, що серед основних існуючих схем інертизації вантажних приміщень суден-газовозів (якими є каскадна, паралельна та напівкаскадна) найбільш оптимальною з погляду забезпечення енергетичної ефективності є каскадна схема інертизації, далі слідують паралельна та напівкаскадна. Вибір схеми інертизації залежить від рейсового завдання, вимог берегової адміністрації та можливостей порту-розвантаження щодо забезпечення судна азотом, а також характеристик суднової системи генерації інертних газів.

2. Екологічну ефективність процесу інертизації вантажних танків суден-газовозів доцільно оцінювати за значеннями потужності генератора інертних газів, часу роботи генератора інертних газів, об'єму вуглекислого газу, який утворюється за час інертизації. Порівняння показників, що характеризують екологічність процесу інертизації вантажних танків суден-газовозів вантажомісткістю 38646 м³, 88248 м³ та 145673 м³ визначили, що для суден будь-якої вантажомісткості найкращі екологічні показники досягаються за умовою проведення процесу інертизації за каскадною схемою. Використання паралельної та напівкаскадної схем інертизації призводить до 1,19...1,7-ти кратного зменшення часу роботи генератора інертних газів, але за цих умов спостерігається 1,38...2,11-ти кратне збільшення потужності генератора азоту та 1,15...1,24-ти кратне збільшення об'єму діоксидів вуглецю, що потрапляє в довкілля під час забезпечення процесу інертизації.

РОЗДІЛ 5. ОПТИМІЗАЦІЯ ПРОЦЕСУ ІНЕРТИЗАЦІЇ ВАНТАЖНИХ ТАНКІВ СУДЕН-ГАЗОВОЗІВ

П'ятий розділ дисертаційного дослідження присвячено розв'язанню головного завдання – управління суцільністю та рухом розділювального шару, який запобігає сумішутворенню між парами вантажу, що залишилися у вантажному танку, та інертним газом, який подається до вантажного танка, під час забезпечення процесу інертизації, що досягається шляхом оптимізації процесу інертизації вантажних танків суден-газовозів.

Основні результати, що наведені в розділі 5, висвітлені в джерелах [44], [73], [87], [194].

5.1. Розробка технології переспрямування потоку інертного газу, що нагнітається до вантажних танків суден-газовозів під час забезпечення процесу їх інертизації

Дослідження, результати яких надані в розділі 3, висвітили, що якісний (концентрація азоту в атмосфері вантажного танку) та кількісний (час інертизації) показники процесу інертизації залежать від тиску, з яким інертний газ подається до вантажного танку. При цьому критерієм оцінки перебігу процесу інертизації є суцільність розділювального шару, який знаходиться у вантажному танку між інертним газом та парами залишків вантажу. Підвищення тиску нагнітання інертного газу сприяє скороченню часу інертизації, але при цьому у випадку досягнення надкритичного тиску відбувається руйнування розділювального шару. Це змушує повторювати інертизацію, що призводить до збільшення її загальної тривалості, а також підвищує стоянковий час судна та, відповідно, пов'язані з цим витрати.

Негативна дія надкритичного тиску виявляється в його локальній (зонній) дії на окремій ділянці розділювального шару, що знаходиться навпроти вхідного отвору, крізь яке інертний газ потрапляє до вантажного танку.

Зменшення локального (зонного) тиску інертного газу на розділювальний шар можливе за рахунок переспрямування потоку газу під час його потрапляння до вантажного танку. Технологічна схема, яка це забезпечує, надана на рис. 5.1.

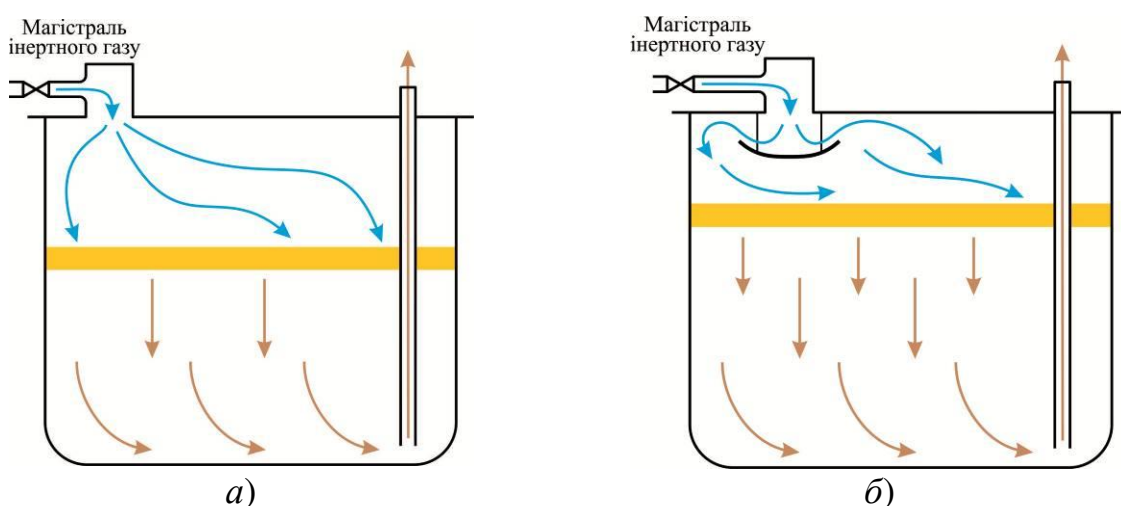


Рис. 5.1. Схема переспрямування потоку інертного газу під час його потрапляння до вантажного танку:
а – стандартна; б – модернізована

Переспрямування потоку інертного газу з одночасним гасінням його швидкості забезпечується шляхом встановлення додаткової параболоподібної відбивної поверхні. Це дозволяє збільшувати загальний тиск інертного газу, причому зменшується його локальна дія та попереджаються контактні взаємодії струменя газу з поверхнею розділювального шару. Це забезпечує цілісність розділювального шару та сприяє проведенню процесу інертизації з максимально можливим тиском інертного газу, що призводить до скорочення часу інертизації.

У процесі руху потоку інертного газу в об'ємі вантажного танку змінюється його температура, густина та тиск. У загальному випадку рух в'язкого теплопровідного газу описується рівняннями Нав'є-Стокса,

суцільності та перенесення теплоти, які характеризують стан газу та залежність її ентальпії від тиску, об'єму та температури. За умови малих втрат тиску, малої швидкості сталого руху та незмінної температури інертні гази в атмосфері вантажного танку можуть розглядатися як ідеальні, нестисливі та нев'язкі гази. Енергетичний баланс відносно елементарного струменя таких газів може бути визначений рівнянням Бернуллі:

$$z\rho g + \frac{\rho\omega^2}{2} + p = \text{const};$$

де z – геометрична висота центра тяжіння перетину газового потоку, м;

ρ – густина газу, кг/м³;

g – прискорення вільного падіння, м/с²;

ω – швидкість газу, м/с;

p – тиск газу, Па.

За умовою малих швидкостей руху струменя газу під час його стикання з параболоподібною відбивною поверхнею через явище конвективної дифузії (аналітичні вирази якого надані в п. 3.4) здійснюється розпад струменя.

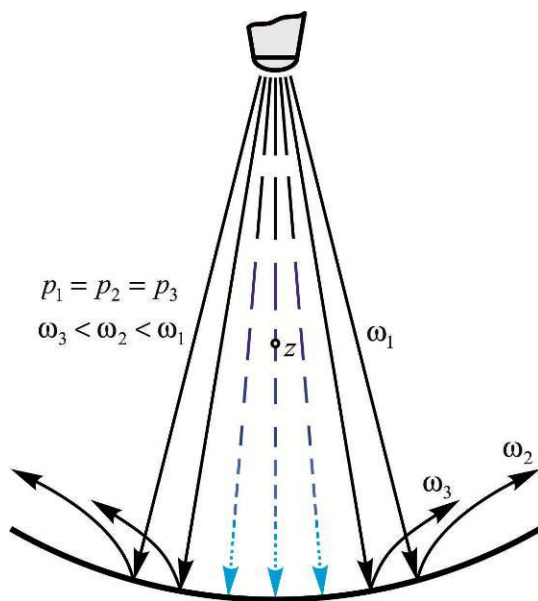


Рис. 5.2. Виникнення явищ розпаду та гасіння струменя інертного газу

Основними характеристиками процесу розпаду струменя є довжина її суцільної. У випадку встановлення напроти вхідного газового отвору параболоподібною відбивної поверхні разом із розпадом струменя газу виникає явище його гасіння. Цьому сприяють зворотні потоки інертного газу, що відбиваються від встановленої поверхні та рухаються в зустрічному з основним потоком напрямку (рис. 5.2).

5.2. Дослідження процесу інертизації на суднах-газовозах

з модернізованою системою інертних газів

5.2.1. Моніторинг атмосфери вантажних танків на судні-газовозі з

вантажомісткістю 38646 м³

Для підтвердження запропонованого в п. 5.1 рішення на судні-газовозі вантажомісткістю 38646 м³ була виконана модернізація системи інертних газів, яка полягала у встановленні параболоподібної відбивної поверхні у верхній частині вантажного танка. Встановлення подібної відбивної поверхні не впливало на кількість вантажу, що завантажувався в танк. Матеріал відбивної поверхні агресивно не впливав ані на вантаж, ані на елементи внутрішньої поверхні вантажного танку [194].

З метою максимальної ідентичності з дослідженнями, технологія та результати яких наведені в п. 3.5.2, вимірювання концентрації азоту за висотою вантажного танка під час цього комплексу випробувань здійснювалось протягом 12 год. Під час досліджень тиск інертного газу складав 1,0 МПа (що є максимально можливим з рекомендованого фрахтувальником експлуатаційного діапазону) та 1,05 МПа (що є максимально можливим з експлуатаційних значень генератора інертних газів). Результати дослідження наведені в таблицях 5.1-5.2.

Таблиця 5.1

Зміна концентрації азоту під час тиску нагнітання 1,00 МПа

Час, год	Концентрація азоту за різної висоти вантажного танка				
	0,95h	0,8h	0,5h	0,2h	0,05h
2	100	82	64	32	6
4	100	92	78	64	43
6	100	100	97	82	65
8	100	100	100	100	100
10	100	100	100	100	100
12	100	100	100	100	100

*Зеленим виділено час, за який завершується процес інертизації.

Таблиця 5.2

Зміна концентрації азоту під час тиску нагнітання 1,05 МПа

Час, год	Концентрація азоту за різної висоти вантажного танка				
	0,95h	0,8h	0,5h	0,2h	0,05h
2	100	86	72	56	22
4	100	100	83	77	54
6	100	100	100	100	97
8	100	100	100	100	100
10	100	100	100	100	100
12	100	100	100	100	100

* Зеленим виділено час, за який завершується процес інертизації.

Порівняння результатів досліджень, що відображають зміну концентрації азоту в атмосфері вантажного танка під час використання стандартної системи інертизації вантажних танків (з урахуванням даних таблиць 3.2, 3.3 та рис. 3.14, 3.15) та модернізованої системи інертизації (з урахуванням даних таблиці 5.2), наведено на рис. 5.3, 5.4.

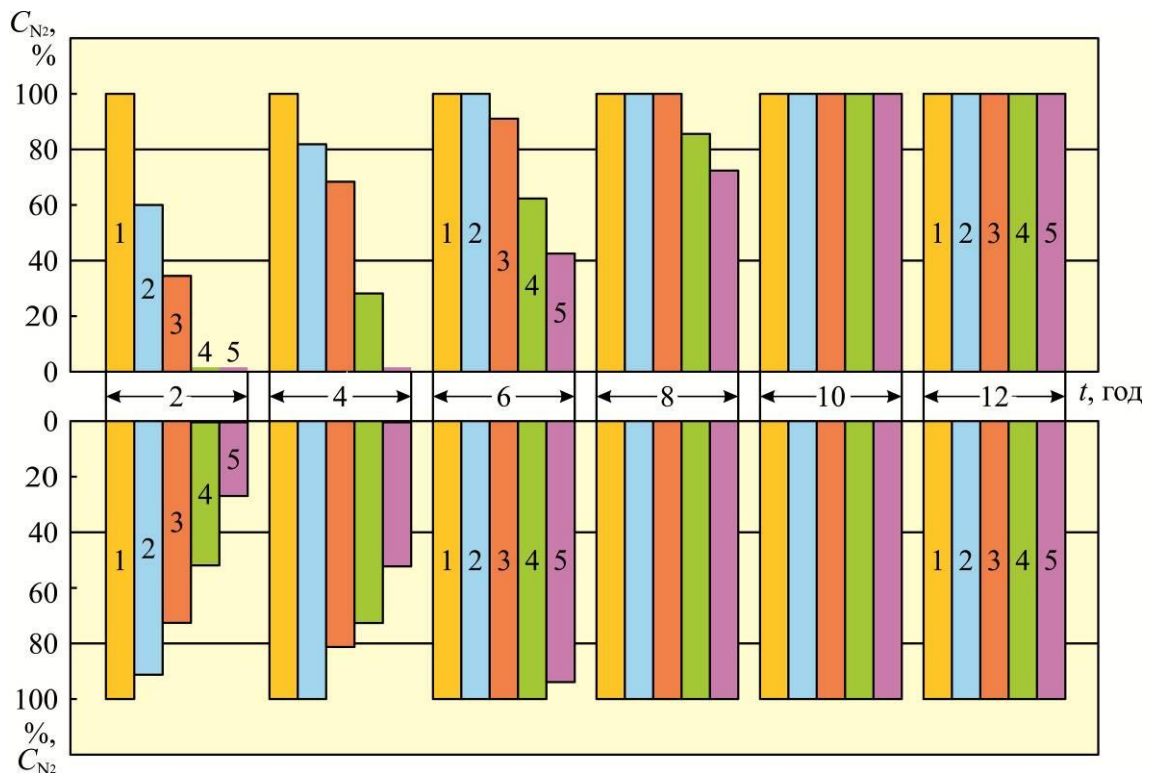


Рис. 5.3. Зміна концентрації азоту у вантажних танках судна-газовоза вантажомісткістю 38646 м³ без модернізації (верхня частина, тиск нагнітання 0,90 МПа), з модернізацією (нижня частина, тиск нагнітання 1,10 МПа):

1 – 0,95h; 2 – 0,8h; 3 – 0,5h; 4 – 0,2h; 5 – 0,05h

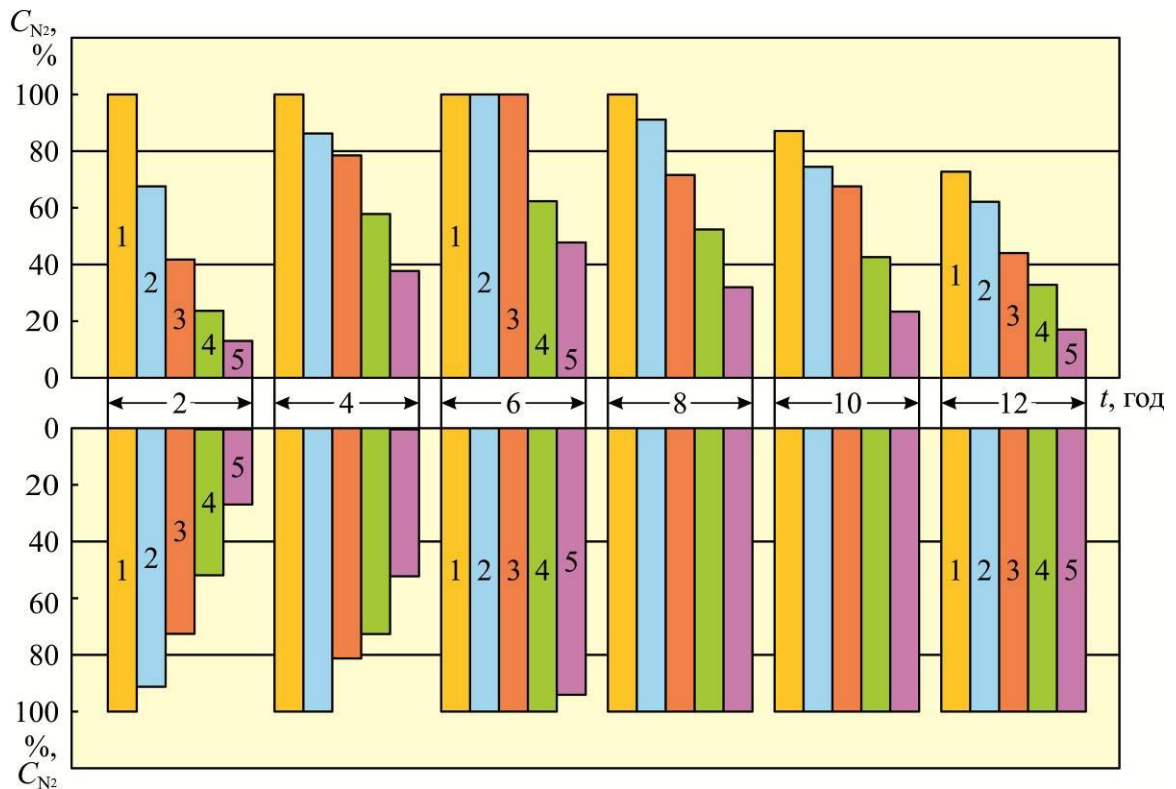


Рис. 5.4. Зміна концентрації азоту у вантажних танках судна-газовоза вантажомісткістю 38646 м³ без модернізації (верхня частина, тиск нагнітання 0,95 МПа), модернізована (нижня частина, тиск нагнітання 1,10 МПа):
1 – 0,95h; 2 – 0,8h; 3 – 0,5h; 4 – 0,2h; 5 – 0,05h

5.2.2. Моніторинг атмосфери вантажних танків на судні-газовозі з вантажомісткістю 88248 м³

За вказаною в п. 5.1 схемою була встановлена параболоподібна відбивна поверхня на судні-газовозі вантажомісткістю 88248 м³. З метою максимальної ідентичності з дослідженнями, технологія та результати яких наведені в п. 3.5.4, вимірювання концентрації азоту за висотою вантажного танку під час цього комплексу випробувань здійснювалась протягом 14 год. Під час досліджень тиск інертного газу складав 1,05 МПа (що є максимально можливим з рекомендованого фрахтувальником експлуатаційного діапазону) та 1,10 МПа (що є максимально можливим з експлуатаційних значень генератора інертних газів). Результати досліджень наведені в таблицях 5.3-5.4.

Таблиця 5.3

Зміна концентрації азоту під час тиску нагнітання 1,05 МПа

Час, год	Концентрація азоту за різної висоти вантажного танка				
	0,95h	0,8h	0,5h	0,2h	0,05h
2	100	64	42	22	8
4	100	82	71	56	34
6	100	96	82	78	48
8	100	100	100	91	83
10	100	100	100	97	92
12	100	100	100	100	100
14	100	100	100	100	100

*Зеленим виділено час, за який завершується процес інертизації.

Таблиця 5.4

Зміна концентрації азоту під час тиску нагнітання 1,10 МПа

Час, год	Концентрація азоту за різної висоти вантажного танка				
	0,95h	0,8h	0,5h	0,2h	0,05h
2	100	76	64	46	28
4	100	95	83	68	49
6	100	100	92	82	67
8	100	100	100	96	91
10	100	100	100	100	100
12	100	100	100	100	100
14	100	100	100	100	100

*Зеленим виділено час, за який завершується процес інертизації.

Порівняння результатів досліджень, що відображають зміну концентрації азоту в атмосфері вантажного танку під час використання стандартної системи інертизації вантажних танків (з урахуванням даних таблиць 3.8, 3.9 та рис. 3.20, 3.21) та модернізованої системи інертизації (з урахуванням даних таблиці 5.4), наведено на рис. 5.5, 5.6.

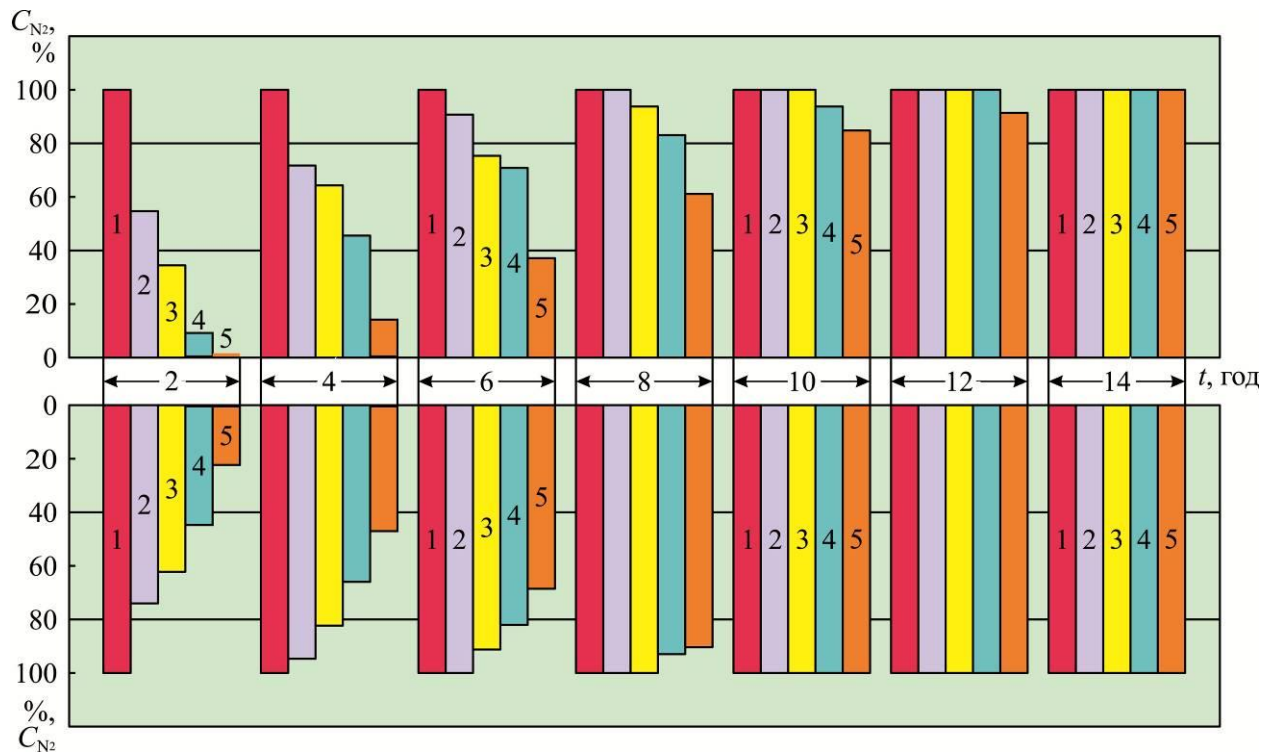


Рис. 5.5. Зміна концентрації азоту у вантажних танках судна-газовоза вантажомісткістю 88248 м³ без модернізації (верхня частина, тиск нагнітання 0,95 МПа), модернізована (нижня частина, тиск нагнітання 1,10 МПа):

1 – 0,95h; 2 – 0,8h; 3 – 0,5h; 4 – 0,2h; 5 – 0,05h

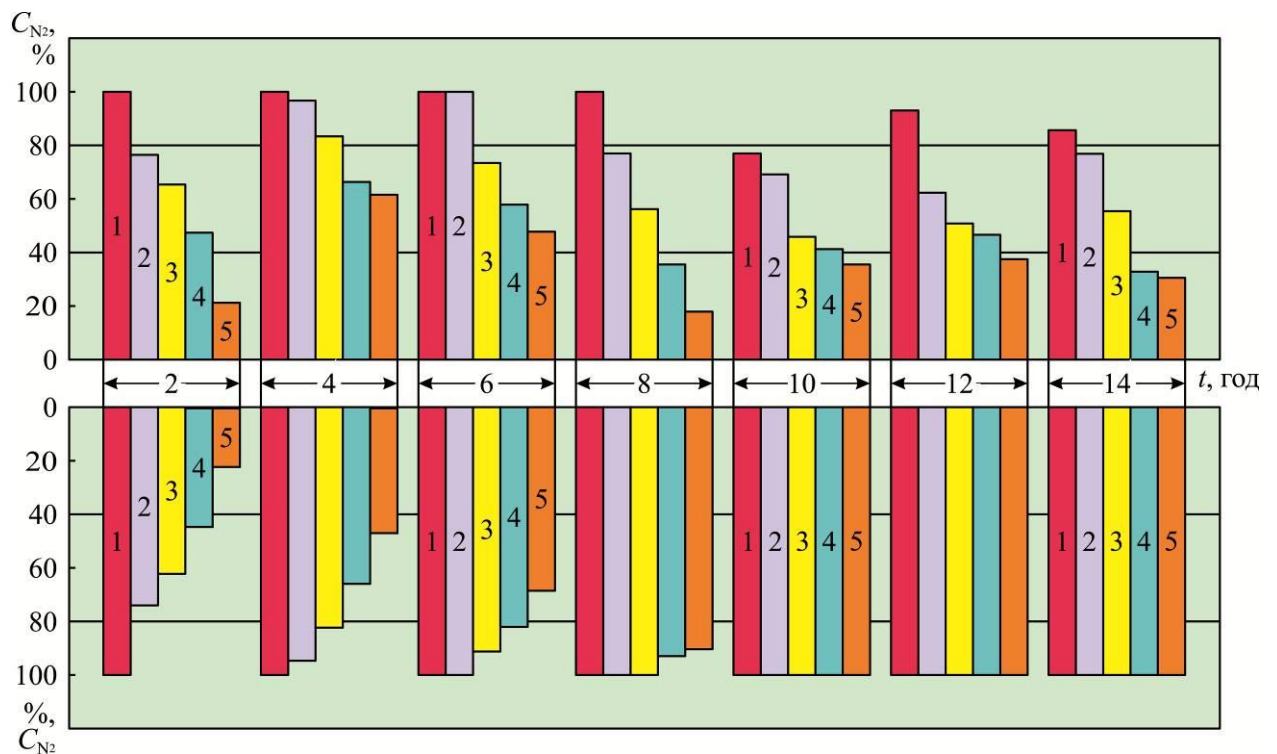


Рис. 5.6. Зміна концентрації азоту у вантажних танках судна-газовоза вантажомісткістю 88248 м³ без модернізації (верхня частина, тиск нагнітання 1,00 МПа), модернізована (нижня частина, тиск нагнітання 1,10 МПа):

1 – 0,95h; 2 – 0,8h; 3 – 0,5h; 4 – 0,2h; 5 – 0,05h

5.2.3. Моніторинг атмосфери вантажних танків на судні-газовозі з вантажомісткістю 145673 м³

З метою збільшення масиву експериментальних даних технологія використання додаткової параболоподібної відбивної поверхні була також впроваджена на судні-газовозі вантажомісткістю 145673 м³.

З метою максимальної ідентичності з дослідженнями, технологія та результати яких наведені в п. 3.5.5, вимірювання концентрації азоту за висотою вантажного танка під час цього комплексу випробувань здійснювалась протягом 14 год. Під час досліджень тиск інертного газу складав 1,15 МПа (що є максимально можливим з рекомендованого фрахтувальником експлуатаційного діапазону) та 1,20 МПа (що є максимально можливим з експлуатаційних значень генератора інертних газів). Результати дослідження наведені в таблицях 5.5-5.6.

Таблиця 5.5

Зміна концентрації азоту під час тиску нагнітання 1,15 МПа

Час, год	Концентрація азоту за різної висоти вантажного танка				
	0,95h	0,8h	0,5h	0,2h	0,05h
2	100	62	38	15	6
4	100	87	62	32	18
6	100	100	82	63	44
8	100	100	97	81	64
10	100	100	100	93	82
12	100	100	100	100	92
14	100	100	100	100	100

*Зеленим виділено час, за який завершується процес інертизації.

Таблиця 5.6

Зміна концентрації азоту під час тиску нагнітання 1,20 МПа

Час, год	Концентрація азоту за різної висоти вантажного танка				
	0,95h	0,8h	0,5h	0,2h	0,05h
2	100	78	51	33	14
4	100	91	81	57	37
6	100	100	87	77	55
8	100	100	100	83	78
10	100	100	100	100	100
12	100	100	100	100	100
14	100	100	100	100	100

*Зеленим виділено час, за який завершується процес інертизації.

Порівняння результатів досліджень, що відображають зміну концентрації азоту в атмосфері вантажного танку під час використання стандартної системи інертизації вантажних танків (з урахуванням даних рис. 3.23, 3.24) та модернізованої системи інертизації (з урахуванням даних таблиці 5.6), наведено на рис. 5.7, 5.8. При цьому вгору відносно вісі часу відкладені значення концентрації азоту у вантажних танках судна-газовозу під експлуатації системи інертних газів без модернізації, вниз – значення, що були отримані під час експлуатації системи інертних газів зі встановленою в верхній частині танка параболоподібної відбивної поверхні.

Випробування в обох випадках виконувались під час перевезення також самого вантажу, визначення концентрації азоту виконувалось в однакові проміжки часу з використанням одного і того ж вимірювального обладнання. Це дозволяло констатувати сталість експерименту для обох випадків – без модернізації системи інертних газів та зі модернізацією.

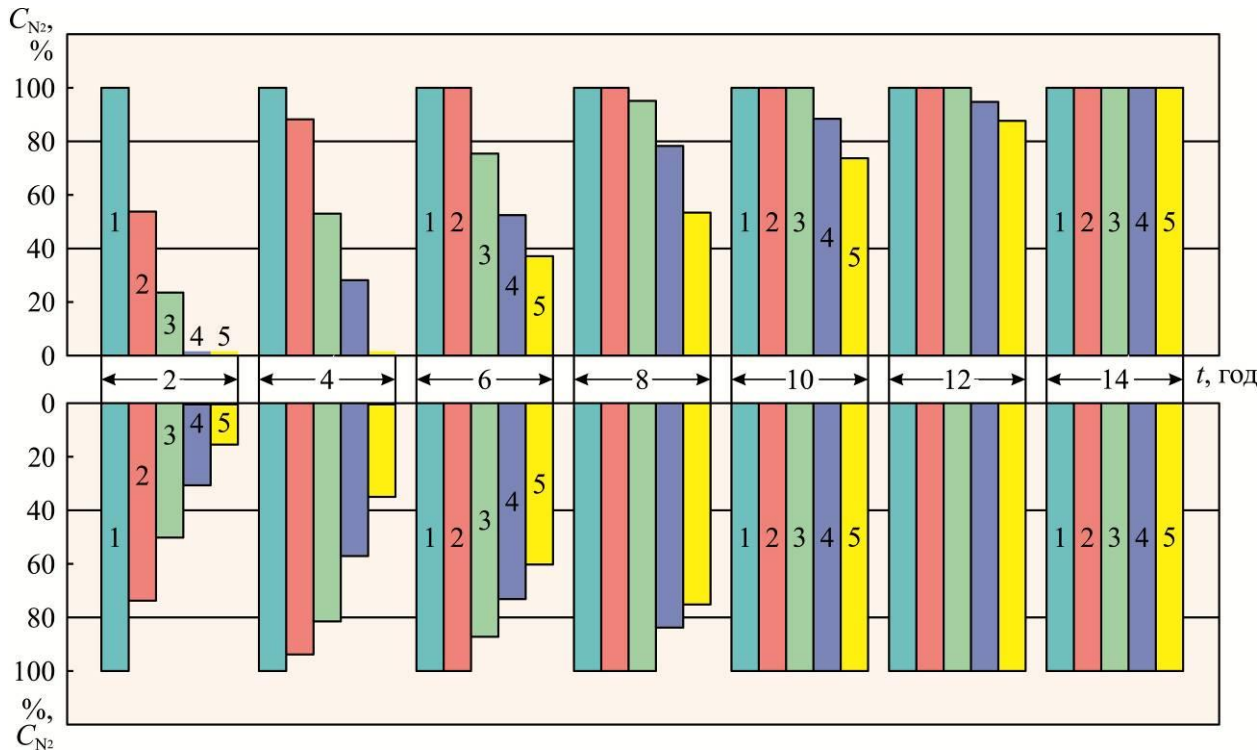


Рис. 5.7. Зміна концентрації азоту у вантажних танках судна-газовоза вантажомісткістю 145673 м³ без модернізації (верхня частина, тиск нагнітання 1,15 МПа), модернізована (нижня частина, тиск нагнітання 1,20 МПа):
1 – 0,95h; 2 – 0,8h; 3 – 0,5h; 4 – 0,2h; 5 – 0,05h

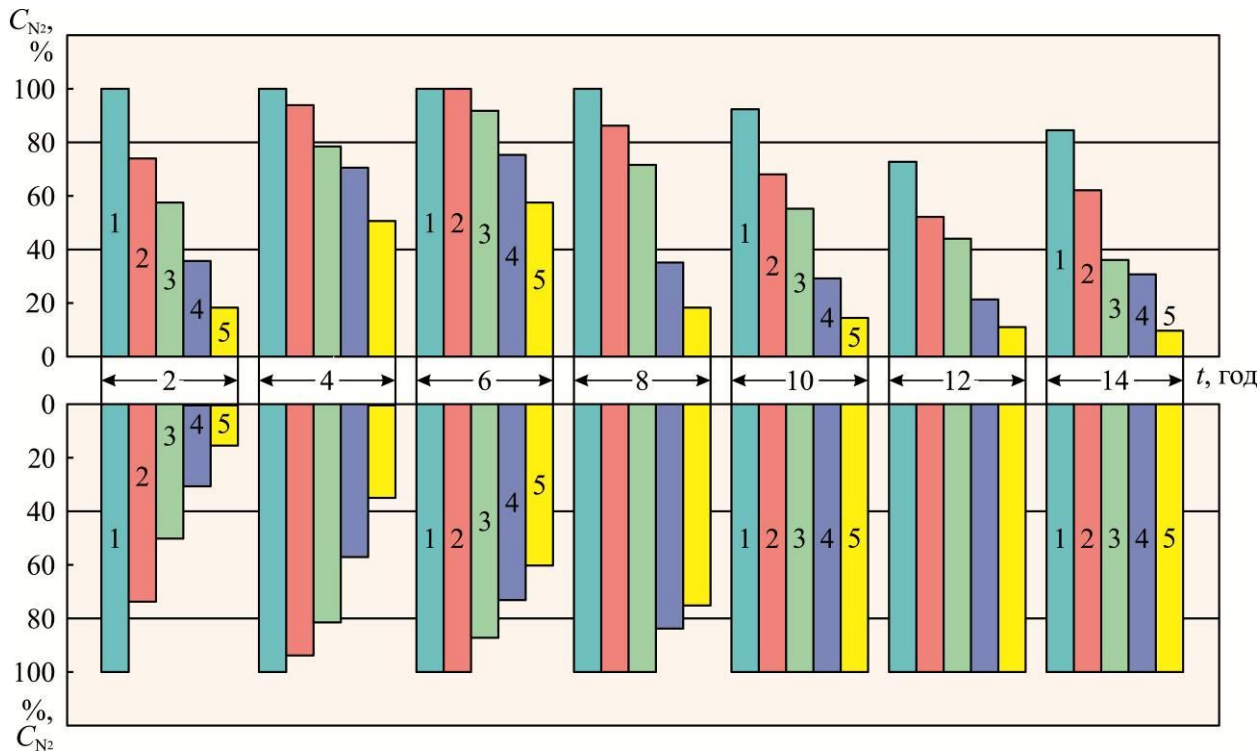


Рис. 5.8. Зміна концентрації азоту у вантажних танках судна-газовоза вантажомісткістю 145673 м³ без модернізації (верхня частина, тиск нагнітання 1,05 МПа), модернізована (нижня частина, тиск нагнітання 1,20 МПа):
1 – 0,95h; 2 – 0,8h; 3 – 0,5h; 4 – 0,2h; 5 – 0,05h

5.2.4. Узагальнені результати моніторингу атмосфери вантажних танків на суднах-газовозах

Узагальнення результатів досліджень, що виконані на суднах-газовозах вантажомісткістю 38646 м³, 88248 м³ та 145673 м³ з модернізованою системою інертизації вантажних танків відносно визначення надкритичного тиску інертного газу та часу, необхідного на забезпечення процесу інертизації, а також їх порівняння з подібними результатами випробувань, що проводились для стандартної системи інертизації (за яким в деяких випадках здійснюється руйнування розділювального шару), надано в таблиці 5.7.

Таблиця 5.7

Узагальнення результатів досліджень, що виконані на суднах-газовозах різної вантажомісткості

Вантажомісткість, м ³	Надкритичний тиск інертного газу, МПа		Тривалість інертизації, год	
	стандартна схема	модернізована схема	стандартна схема	модернізована схема
38646	1,05	>1,10	10	8
88248	1,00	>1,10	14	10
145673	1,15	>1,2	14	10

**Червоним позначений тиск, який відповідає руйнуванню розділювального шару за певних умов*

Для кращої візуалізації результати таблиці 5.7 представлені у вигляді діаграм (рис. 5.9).

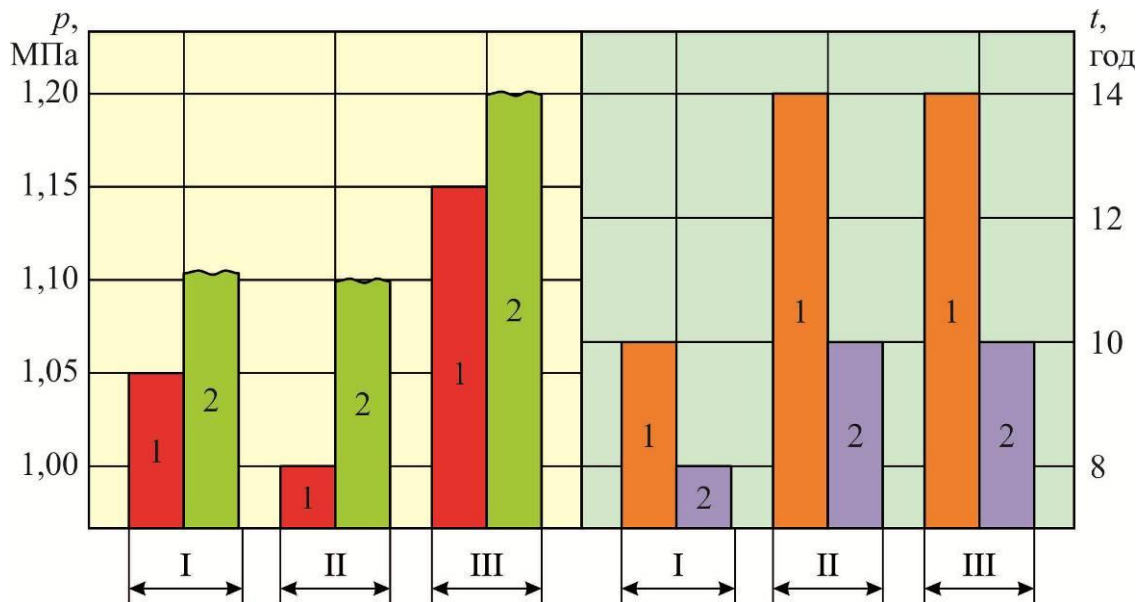


Рис. 5.9. Визначення тиску та часу проведення процесу інертизації для суден-газовозів різної вантажомісткості:

1 – стандартна система; 2 – модернізована система; вантажомісткість:

I – 38646 м³; II – 88248 м³; III – 145673 м³

(червоним в лівій частині діаграми позначений тиск, який відповідає руйнуванню розділювального шару за певних умов)

Визначимо, що підвищення тиску нагнітання інертного газу сприяє збільшенню його витрати, при цьому потужність генератора інертних газів зростає на 10...60 кВт (або на 1...4 %) залежно від вантажомісткості судна-газовоза. При цьому це зростання не спричиняє суттєвого впливу на загальне навантаження суднових дизель-генераторів, середньостатистична потужність яких під час проведення дослідження знаходилась у межах 850...1100 кВт для суден газозовів вантажомісткістю до 50000 м³; 1650...1900 кВт для суден газозовів вантажомісткістю 50000...100000 м³; 2350...2700 кВт для суден газозовів вантажомісткістю більше за 100000 м³.

5.3. Визначення енергетичної ефективності методів інертизації вантажних танків суден-газовозів з модернізованою системою інертних газів

Визначення енергетичної ефективності методів інертизації вантажних танків під час використання модернізованої системи інертизації виконувалось для суден-газовозів вантажомісткістю 38646 м³, 88248 м³ та 145673 м³. Відповідно до технології, що викладена в п. 4.1, процес інертизації по черзі для кожного окремого транспортування ЗПГ виконувався за каскадною (під час першого транспортування), паралельною (для другого транспортування) та напівкаскадною (для третього транспортування) схемами. Об'єм та характеристики вантажу, що при цьому транспортувався, залишалися незмінними. Це забезпечувало коректність отриманих результатів з визначення енергетичної ефективності методів інертизації, що отримані на одному судні-газовозі під час різних транспортувань [44, 80].

Під час проведення досліджень визначались показники, що дозволяли розрахувати значення відносної витрати азоту \bar{G} , відносної тривалості процесу інертизації \bar{t} та відносні витрати енергії \bar{K}_E для каскадної, паралельної та напівкаскадної схем інертизації вантажних танків. У додаток до цього, за виразом

$$\Delta_{\bar{K}_E} = \frac{\bar{K}_E^C}{\bar{K}_E^M};$$

де \bar{K}_E^C, \bar{K}_E^M – витрати енергії під час використання стандартної та модернізованої схем інертизації, розраховувались значення зменшення енергетичних витрат, які забезпечуються у випадку використання модернізованої системи інертизації.

Результати вказаних досліджень наведені в таблиці 5.8 та узагальнені у вигляді рис. 5.10-5.12.

Таблиця 5.8

Визначення енергетичної ефективності процесу інертизації вантажних танків суден-газовозів

Ванта- жоміст- кість, м ³	Відносна витрата азоту			Відносна тривалість процесу інертизації			Відносні витрати енергії			Зменшення відносних витрат енергії, %		
	каскадна	пара- лельна	напів- каскадна	каскадна	пара- лельна	напів- каскадна	каскадна	пара- лельна	напів- каскадна	каскадна	пара- лельна	напів- каскадна
38646	$\frac{1}{1}$	$\frac{2,53}{2,61}$	$\frac{1,98}{2,04}$	$\frac{1}{1}$	$\frac{0,55}{0,51}$	$\frac{0,75}{0,69}$	$\frac{1}{1}$	$\frac{1,392}{1,331}$	$\frac{1,485}{1,408}$	1	4,34	5,21
88248	$\frac{1}{1}$	$\frac{2,08}{2,11}$	$\frac{1,78}{1,81}$	$\frac{1}{1}$	$\frac{0,58}{0,54}$	$\frac{0,79}{0,74}$	$\frac{1}{1}$	$\frac{1,206}{1,139}$	$\frac{1,406}{1,339}$	1	5,55	4,75
145673	$\frac{1}{1}$	$\frac{1,44}{1,48}$	$\frac{1,38}{1,41}$	$\frac{1}{1}$	$\frac{0,59}{0,55}$	$\frac{0,82}{0,77}$	$\frac{1}{1}$	$\frac{0,850}{0,814}$	$\frac{1,132}{1,086}$	1	4,19	4,06

У чисельнику – під час використання стандартної системи. В знаменнику – під час використання модернізованої системи.

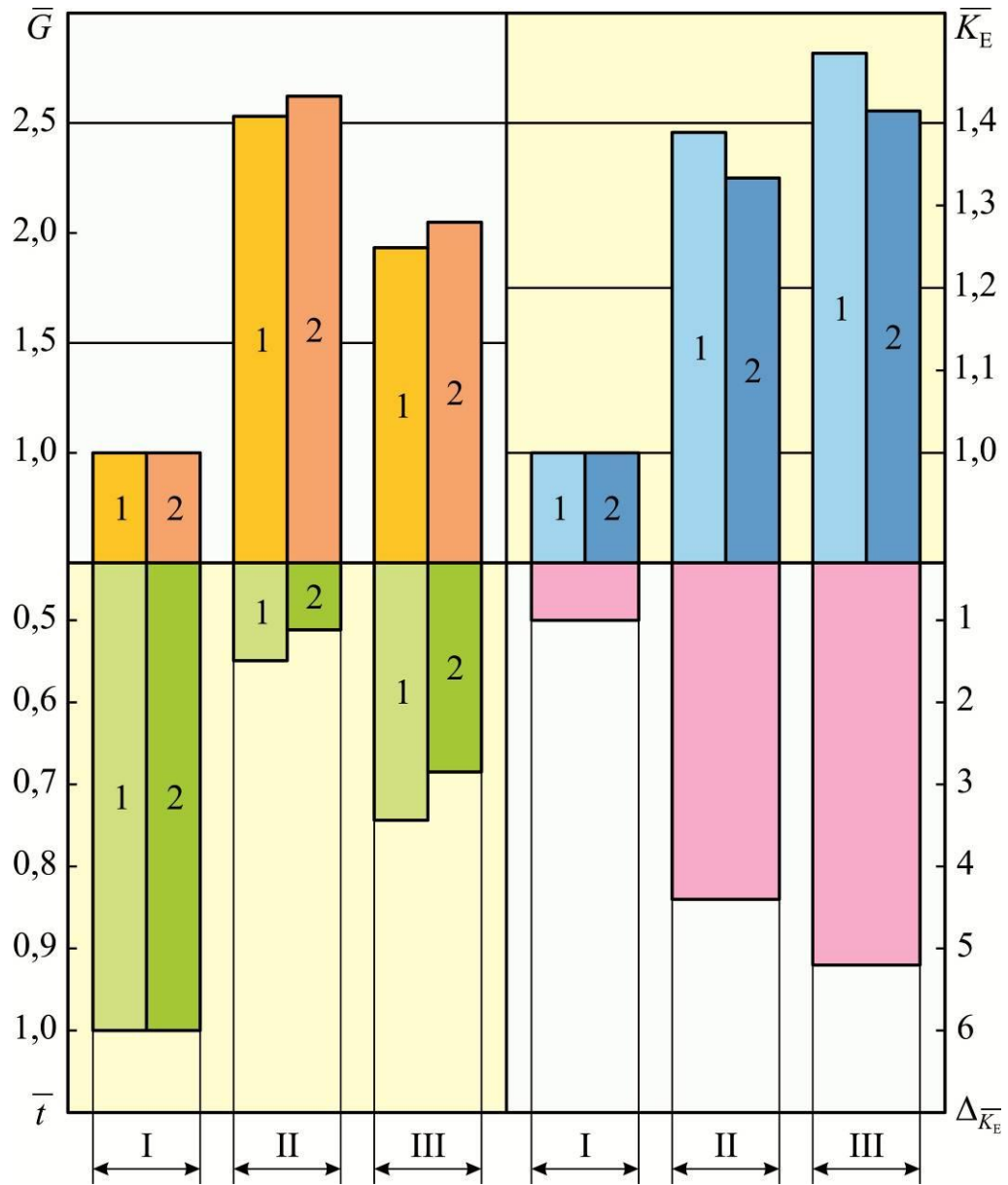


Рис. 5.10. Показники, що характеризують енергетичну ефективність процесу інертизації судна-газовоза вантажомісткістю 38646 м³:

1 – стандартна система; 2 – модернізована система;

I – каскадна, II – паралельна, III – напівкаскадна схеми

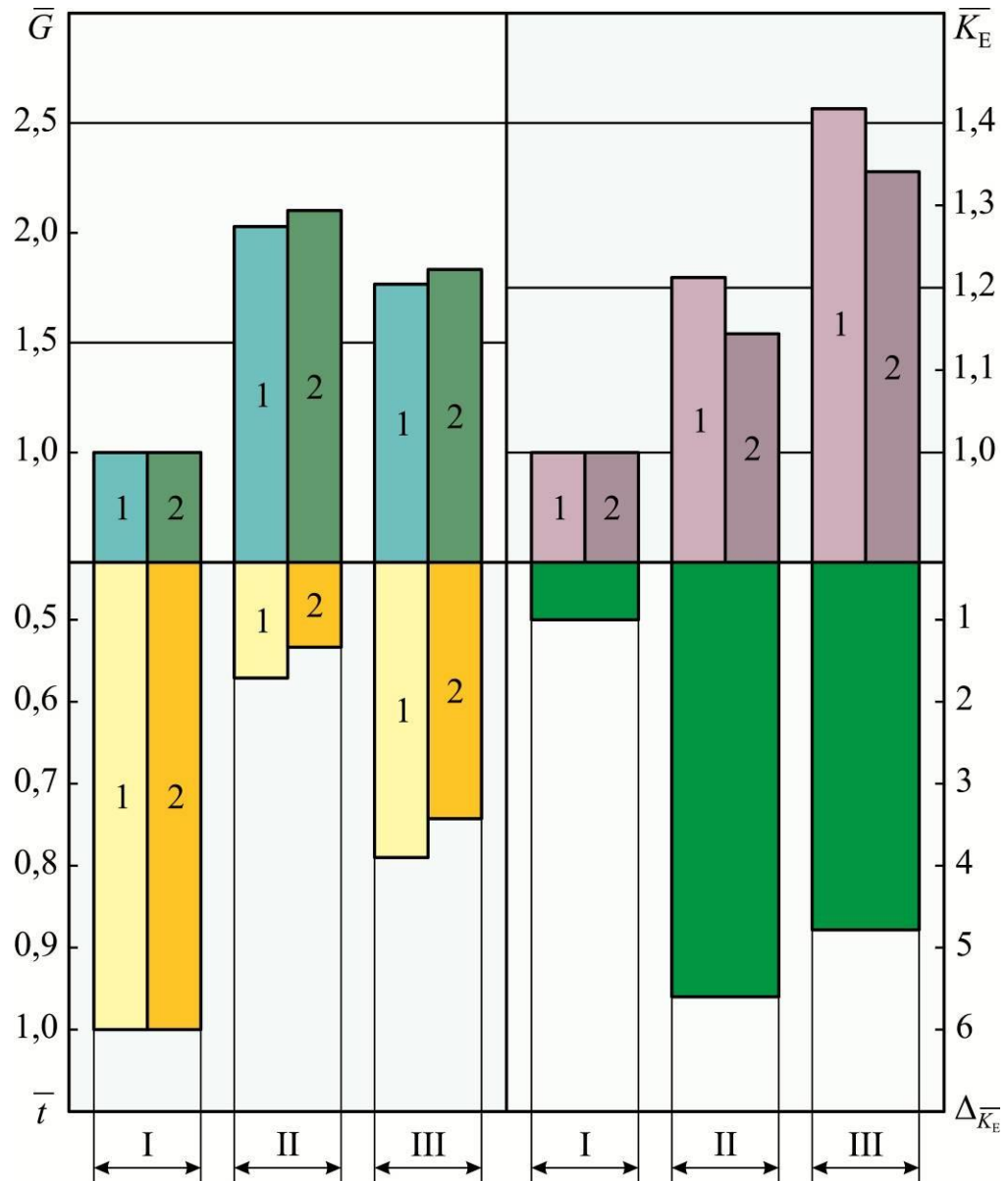


Рис. 5.11. Показники, що характеризують енергетичну ефективність процесу інертизації судна-газовоза вантажомісткістю 88248 м³:

1 – стандартна система; 2 – модернізована система;

I – каскадна, II – паралельна, III – напівкаскадна схеми

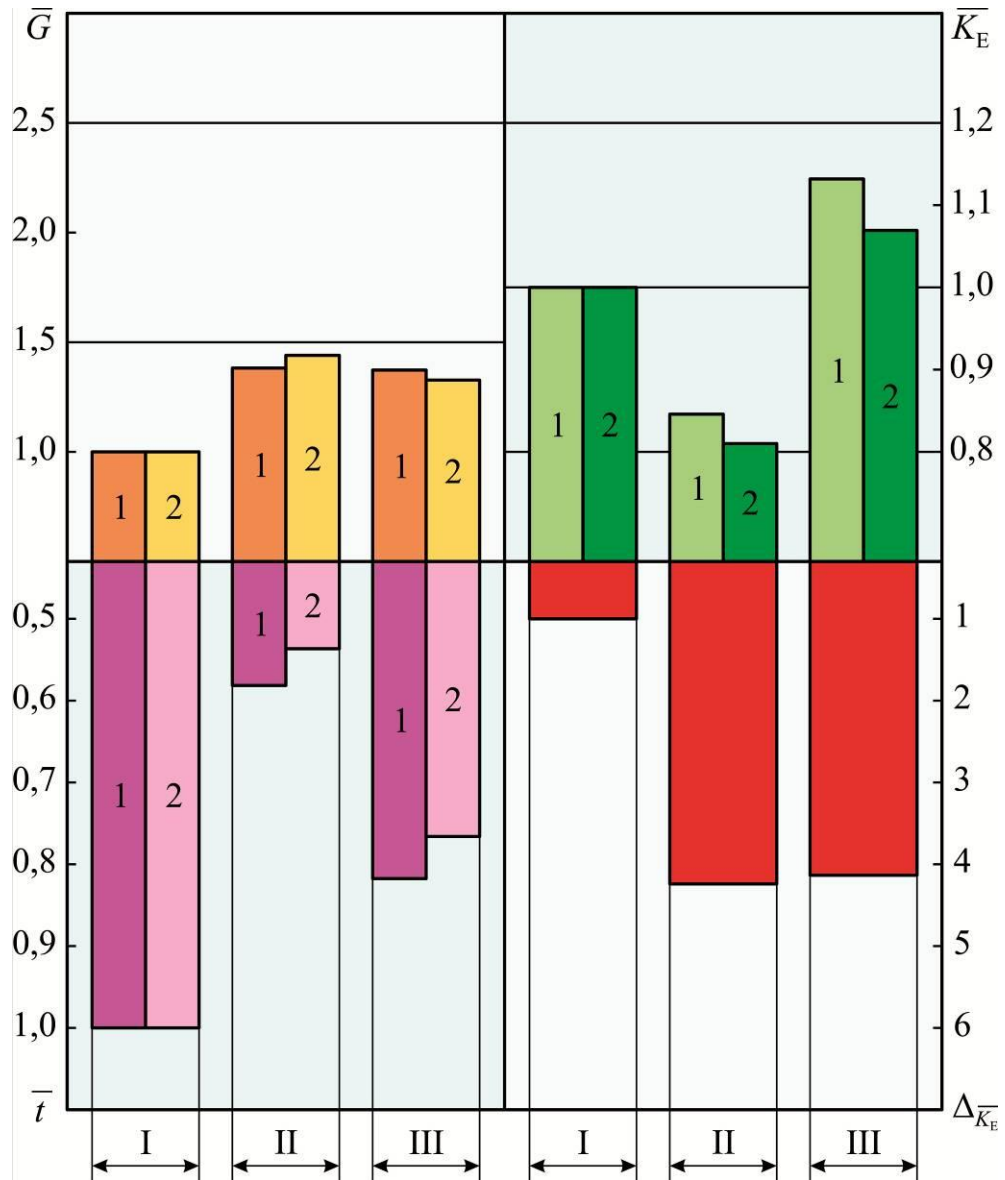


Рис. 5.12. Показники, що характеризують енергетичну ефективність процесу інертизації судна-газовозу вантажомісткістю 145673 м³:

1 – стандартна система; 2 – модернізована система;

I – каскадна, II – паралельна, III – напівкаскадна схеми

5.4. Визначення екологічної ефективності методів інертизації вантажних танків суден-газовозів з модернізованою системою інертних газів

Визначення екологічної ефективності методів інертизації вантажних танків під час використання модернізованої системи інертизації виконувалось для суден-газовозів вантажомісткістю 38646 м³, 88248 м³ та 145673 м³ – на яких, відповідно до технології, що вказана в п. 5.1, була встановлена параболоподібна відбивна поверхня. Відповідно до технології, що викладена в п. 4.1, процес інертизації по черзі для кожного окремого транспортування ЗПГ виконувався за каскадною (під час першого транспортування), паралельною (для другого транспортування) та напівкаскадною (для третього транспортування) схемами. Об'єм та характеристики вантажу, що при цьому транспортувався, залишалися незмінними. Це забезпечувало коректність отриманих результатів з визначення енергетичної ефективності методів інертизації, що отримані на одному судні-газовозі під час різних транспортувань [73, 87].

Під час проведення досліджень визначались показники, що дозволяли розрахувати значення кількості діоксидів вуглецю, утворення яких пов'язане з необхідністю забезпечення енергією генератора інертних газів. До них були віднесені:

- потужність генератора інертних газів $N_{ГІГ}$, кВт;
- час роботи генератора інертних газів для забезпечення процесу інертизації t , год;
- об'єм діоксиду вуглецю, який утворюється за час інертизації у зв'язку з роботою судових дизель-генераторів, $V_{CO_2}^c$, м³/цикл

Результати досліджень наведені в таблиці 5.9.

Таблиця 5.9

Визначення екологічної ефективності процесу інертизації вантажних танків суден-газовозів

Ванта- жоміст- кість, м ³	Потужність генератора інертних газів, N _{ГП} , кВт			Час роботи генератора інертних газів, t, год			Об'єм вуглекислого газу, який утворюється за час інертизації			Відносний коефіцієнт викидів CO ₂		
	каскадна	пара- лельна	напів- каскадна	каскадна	пара- лельна	напів- каскадна	каскадна	пара- лельна	напів- каскадна	каскадна	пара- лельна	напів- каскадна
38646	$\frac{450}{460}$	$\frac{950}{960}$	$\frac{620}{630}$	$\frac{9,2}{7,6}$	$\frac{5,4}{4,7}$	$\frac{7,7}{6,6}$	$\frac{1263}{1067}$	$\frac{1565}{1377}$	$\frac{1457}{1268}$	$\frac{1}{1}$	$\frac{1,239}{1,291}$	$\frac{1,153}{1,189}$
88248	$\frac{720}{750}$	$\frac{1420}{1470}$	$\frac{1180}{1230}$	$\frac{13,8}{10,1}$	$\frac{8,6}{6,8}$	$\frac{9,7}{7,7}$	$\frac{3032}{2311}$	$\frac{3726}{3050}$	$\frac{3493}{2890}$	$\frac{1}{1}$	$\frac{1,229}{1,320}$	$\frac{1,152}{1,250}$
145673	$\frac{1150}{1210}$	$\frac{2180}{2230}$	$\frac{1840}{1890}$	$\frac{13,4}{9,9}$	$\frac{8,4}{7,3}$	$\frac{9,6}{7,9}$	$\frac{4702}{3655}$	$\frac{5588}{4967}$	$\frac{5390}{4556}$	$\frac{1}{1}$	$\frac{1,188}{1,359}$	$\frac{1,146}{1,246}$

У чисельнику – під час використання стандартної системи. У знаменнику – під час використання модернізованої системи.

Використання модернізованої системи інертизації вантажних танків суден-газовозів скорочує тривалість процесу інертизації – що є головною перевагою запропонованої технології. Зменшення часу інертизації сприяє зменшенню кількості діоксидів вуглецю, що утворюється під час забезпечення необхідною потужністю генератора інертних газів. Відносні зменшення цих величин (порівняно зі стандартною системою інертизації) визначалось за виразами:

- відносне зменшення тривалості процесу інертизації

$$\Delta t = \frac{t_c - t_m}{t_c} \cdot 100 \%;$$
(5.1)

- відносне зменшення кількості діоксидів вуглецю

$$\Delta V_{\text{CO}_2} = \frac{V_{\text{CO}_2}^c - V_{\text{CO}_2}^m}{V_{\text{CO}_2}^m} \cdot 100 \%;$$
(5.2)

де t_c, t_m – час інертизації у випадку стандартної та модернізованої системи;
 $V_{\text{CO}_2}^c, V_{\text{CO}_2}^m$ – кількості діоксидів вуглецю, що утворюється у випадку стандартної та модернізованої системи.

Можливість збільшення тиску нагнітання інертного газу, що потрапляє у вантажні танки, призводить до незначного підвищення потужності генератора інертного газу (див. таблицю 5.9). Ця величина визначалась як

$$\Delta N_{\text{ГГ}} = \frac{N_{\text{ГГ}}^m - N_{\text{ГГ}}^c}{N_{\text{ГГ}}^m} \cdot 100 \%;$$
(5.3)

де $N_{\text{ГГ}}^c, N_{\text{ГГ}}^m$ – потужність генератора азоту у випадку стандартної та модернізованої системи.

Показники $\Delta t, \Delta \text{CO}_2, \Delta N_{\text{ГГ}}$ визначались для суден-газовозів вантажомісткістю 38646 м³, 88248 м³, 145673 м³ під час забезпечення процесу інертизації за каскадною, паралельною та напівкаскадною схемами. Результати цих розрахунків наведені в таблиці 5.10.

Таблиця 5.10

Порівняння стандартної та модернізованої систем інертизації вантажних танків суден-газовозів

Показник	Характеристика судна-газовоза та схема інертизації вантажних танків		
	каскадна	паралельна	напівкаскадна
	судно-газовоз вантажомісткістю 38646 м ³		
Відносне збільшення потужності генератора азоту	2,17	1,04	1,59
Відносне зменшення тривалості процесу інертизації	17,39	12,96	14,29
Відносне зменшення кількості діоксидів вуглецю	15,56	12,05	12,90
	судно газозов вантажомісткістю 88248 м ³		
Відносне збільшення потужності генератора азоту	4,00	3,40	4,07
Відносне зменшення тривалості процесу інертизації	26,81	20,93	20,62
Відносне зменшення кількості діоксидів вуглецю	23,76	18,15	17,25
	судно газозов вантажомісткістю 145673 м ³		
Відносне збільшення потужності генератора азоту	4,96	2,24	2,66
Відносне зменшення тривалості процесу інертизації	26,12	13,09	17,71
Відносне зменшення кількості діоксидів вуглецю	22,26	11,10	15,47

За результатами таблиць 5.9-5.10 побудовані діаграми, що надані на рис. 5.13-5.15.

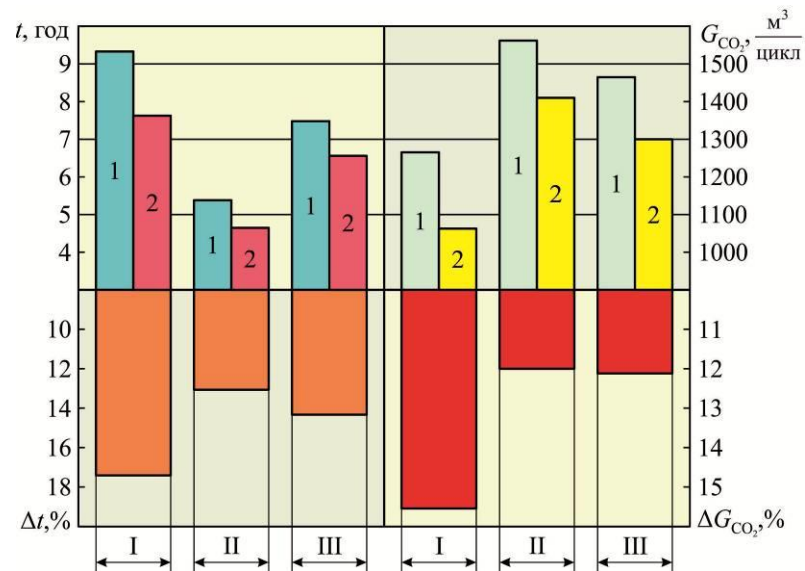


Рис. 5.13. Показники, що характеризують екологічну ефективність процесу інертизації судна-газовозу вантажомісткістю 38646 м³:

1 – стандартна система; 2 – модернізована система;
I – каскадна, II – паралельна, III – напівкаскадна схеми

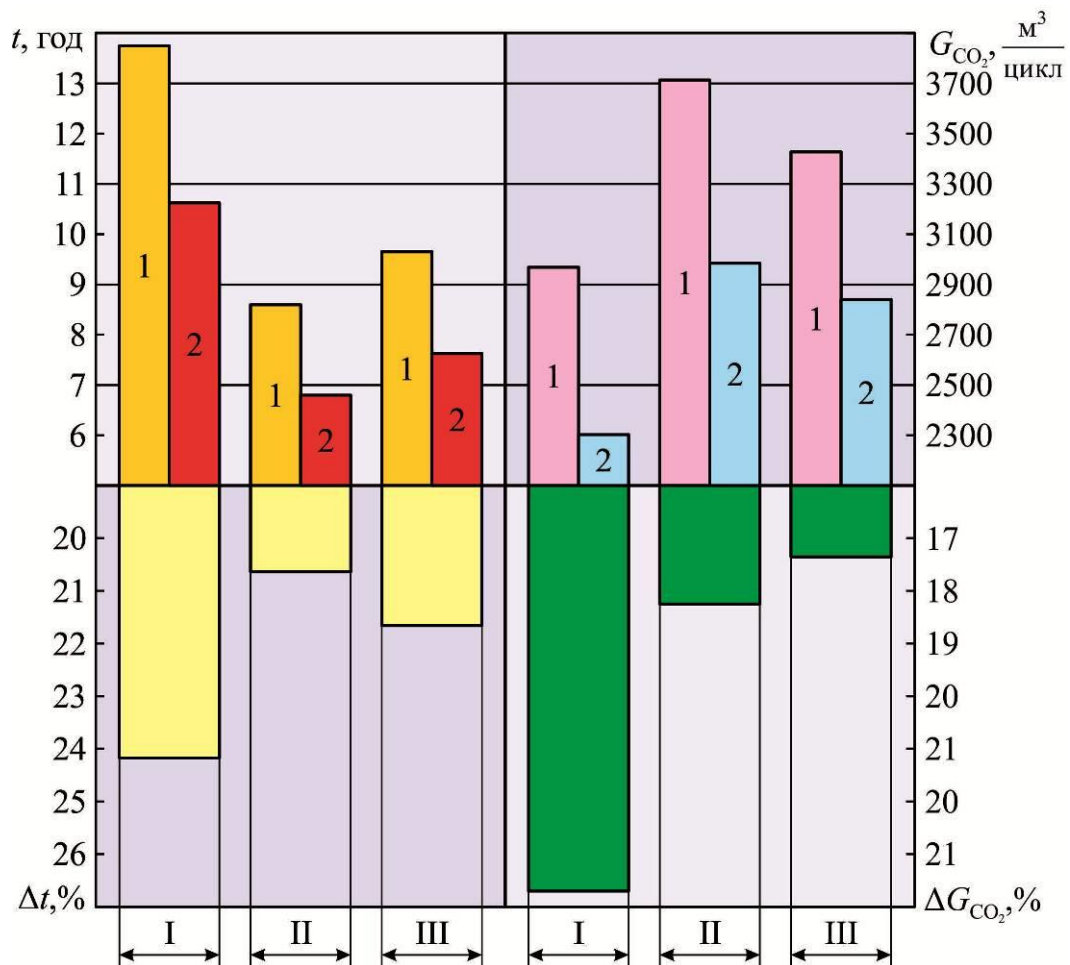


Рис. 5.14. Показники, що характеризують екологічну ефективність процесу інертизації судна-газовозу вантажомісткістю 88248 м³:

1 – стандартна система; 2 – модернізована система;
I – каскадна, II – паралельна, III – напівкаскадна схеми

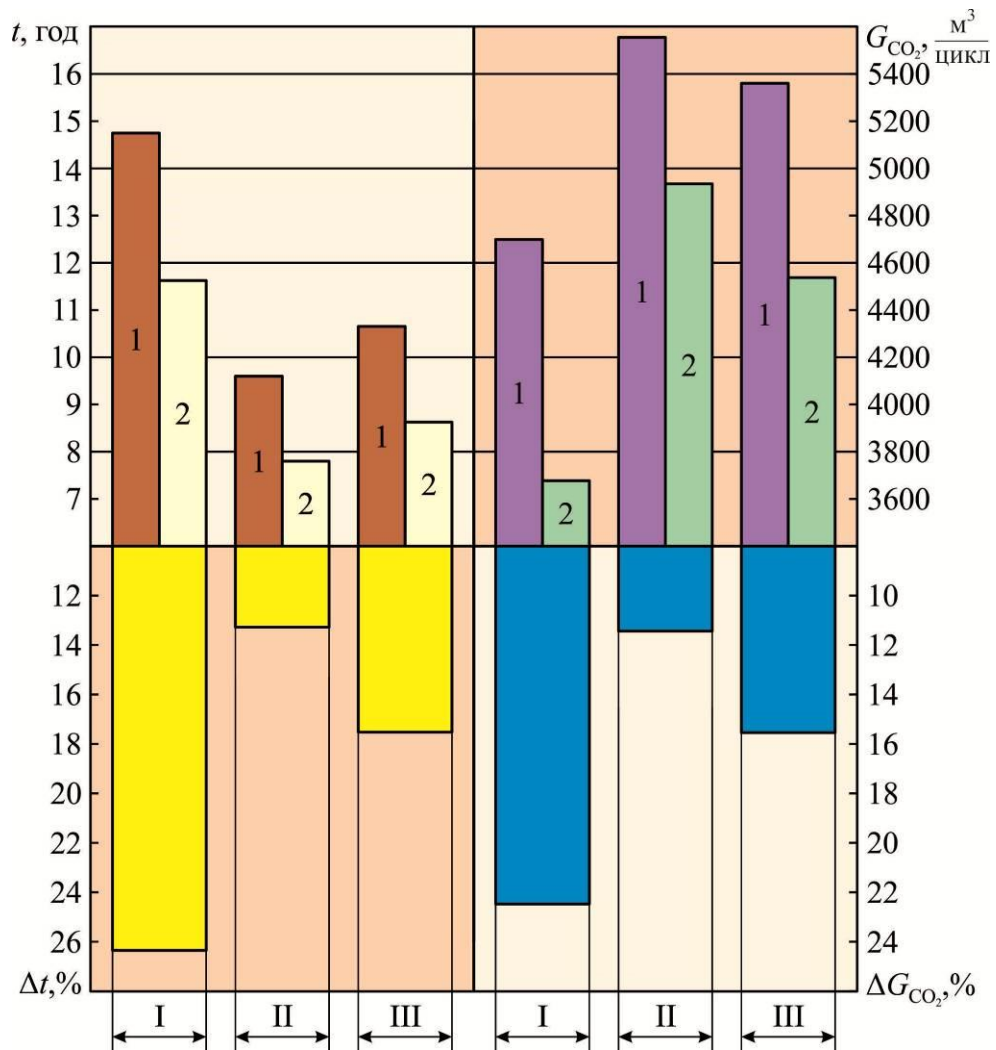


Рис. 5.15. Показники, що характеризують екологічну ефективність процесу інертизації судна-газовозу вантажомісткістю 145673 м³:

1 – стандартна система; 2 – модернізована система;

I – каскадна, II – паралельна, III – напівкаскадна схеми

Порівняння екологічної ефективності процесу інертизації під час нагнітання азоту в вантажні танки за каскадною, паралельною та напівкаскадною схемами виконувалось за виразом:

$$\overline{K}_{\text{CO}_2} = \frac{G_{\text{CO}_2}^{\text{in}}}{G_{\text{CO}_2}^{\text{к}}};$$

де $G_{\text{CO}_2}^{\text{in}}$ – об'єм діоксиду вуглецю CO₂, що утворюється під час інертизації за однієї зі схем (каскадної, паралельної, напівкаскадної);

$G_{\text{CO}_2}^{\text{к}}$ – об'єм діоксиду вуглецю CO_2 , що утворюється під час інертизації за каскадною схемою.

Номограма, що відображає зміну цих значень для суден-газовозів з рідною вантажомісткістю, надана на рис. 5.16.

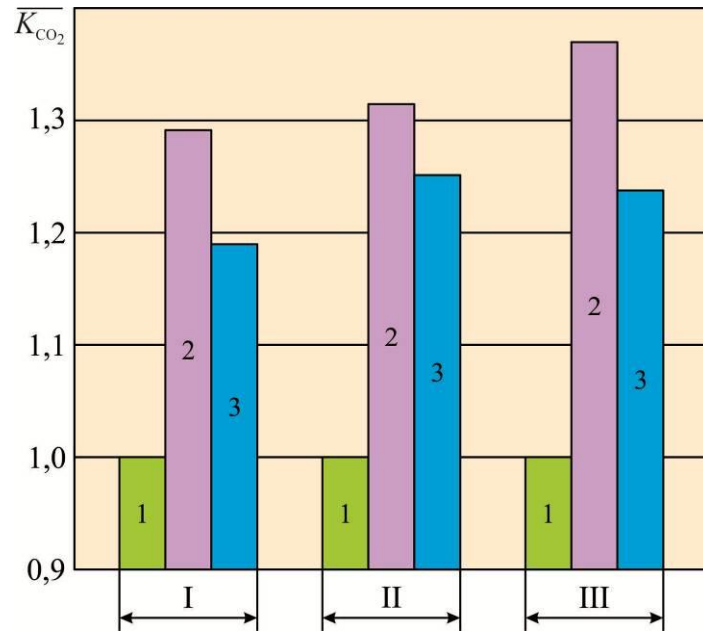


Рис. 5.16. Екологічна ефективність процесу інертизації вантажних танків суден-газовозів під час використання модернізованої системи інертизації:

1 – каскадна, 2 – паралельна, 3 – напівкаскадна схеми;
вантажомісткість: I – 38646 м³; II – 88248 м³; III – 145673 м³

Виконані дослідження підтвердили ефективність використання технології переспрямування потоку інертного газу, що потрапляє до вантажного танку, що досягається шляхом встановлення в його верхній частині параболоподібної відбивної поверхні.

5.5. Висновки за розділом 5

Як результат досліджень, наведених у розділі 5, визначимо таке.

1. Технологія подачі інертних газів у вантажні танки суден-газовозів повинна виконуватися за розробленою проєктувальниками та схваленою та узгодженою з фрахтувальниками схемою. При цьому у випадку підтримання необхідних значень параметрів інертного газу, що подається до вантажних танків, та безперервного контролю атмосфери вантажних танків можливе виконання модернізації системи подачі інертних газів. Ця модернізація не повинна сприяти зменшенню об'єму вантажу, що знаходиться та транспортується у вантажному танку, а також повинна не впливати на необхідний рівень пожежної небезпеки атмосфери вантажного танка.

2. Досягнення цих умов з одночасним виконанням вказаних обмежень можливе шляхом встановлення у верхній частині вантажного танка додаткової параболоподібної відбійної поверхні. Внутрішній параболоподібний профіль цієї поверхні забезпечує виникнення додаткового розпаду та гасіння струменя інертного газу, що потрапляє до вантажного танка. Це сприяє переспрямуванню потоку інертного газу, зменшенню його швидкості та знижує локальний (зонний) тиск з боку інертного газу на розділювальний шар, що знаходиться всередині вантажного танка.

3. Забезпечення цих технологічних дій дозволяє збільшити тиск нагнітання інертного газу, що спрямовується до вантажного танка з одночасним підтриманням суцільності розділювального шару та зменшенням тривалості процесу інертизації.

4. Дослідження, що були виконані на суднах-газовозах вантажомісткістю до 50000 м³, 50000...100000 м³ та більше за 100000 м³ встановили, що використання запропонованої технології дозволяє виробництво інертного газу з максимально можливим тиском нагнітання (який на 7...10 % перевищує значення експлуатаційного тиску) та 20...30 % скорочує

тривалість процесу інертизації вантажних танків. Визначимо, що підвищення тиску нагнітання інертного газу сприяє збільшенню його витрати, при цьому потужність генератора інертних газів зростає на 10...60 кВт (або на 1...4 %) залежно від вантажомісткості судна-газовоза. При цьому це зростання не суттєве впливає на загальне навантаження судових дизель-генераторів, середньостатистична потужність яких під час проведення дослідження знаходилась у межах 850...1100 кВт для суден газозовів вантажомісткістю до 50000 м³; 1650...1900 кВт для суден газозовів вантажомісткістю 50000...100000 м³; 2350...2700 кВт для суден газозовів вантажомісткістю більше за 100000 м³.

5. Використання запропонованої модернізованої системи інертизації вантажних танків сприяє підвищенню енергетичної ефективності процесу інертизації. При цьому для суден-газовозів з різною вантажомісткістю та різною схемою подачі інертних газів до вантажних танків забезпечується зниження витрати азоту (який використовується як інертний газ), зниження тривалості процесу інертизації та зменшення енергетичних витрат на процес інертизації.

6. Зменшення тривалості процесу інертизації під час використання модернізованої системи сприяє зменшенню шкідливих викидів у довкілля, утворення яких пов'язано з роботою теплових двигунів, що забезпечують потужністю генератори інертних газів. Зокрема при цьому для суден-газовозів різної вантажомісткості забезпечується зниження викидів діоксиду вуглецю на 15,6...26,8 %, що сприяє збільшенню екологічної ефективності процесу інертизації вантажних танків.

ВИСНОВКИ

Дисертаційне дослідження спрямоване на розв'язання науково-прикладного завдання – забезпечення процесу інертизації вантажних танків суден-газовозів із найменшими витратами енергії та мінімальною тривалістю.

Інертизація вантажних приміщень є обов'язковим етапом вантажних операцій у порту розвантаження зрідженого природного газу. Її проведення пов'язане з необхідністю видалення залишків вантажу з вантажних танків і з обов'язковим підтриманням такої атмосфери у вантажному танку, яка унеможливорює будь-яке займання, сприяє в такий спосіб забезпеченню пожежної безпеки. Якість, ефективність та безпека проведення процесу інертизації регламентується вимогами класифікаційних товариств та міжнародних організацій, страхових, судновласницьких та суднобудівних фірм і компаній різних країн, а також – вимогами міжнародних конвенцій MARPOL та SOLAS.

Головним науковим результатом дисертаційної роботи є доведена та практично підтверджена теза, що підвищення енергетичної ефективності та екологічної безпеки процесу інертизації вантажних танків суден-газовозів досягається керованим впливом на концентрацію азоту (який використовується як інертний газ) в атмосфері вантажного танка та підтриманням суцільності розділювального шару, що попереджує сумішутворення між парами вантажу, які залишились у вантажному танку, та інертним газом, який подається до вантажного танка.

Основні наукові та практичні результати дисертаційного дослідження.

1. Інертизація вантажних танків суден-газовозів супроводжується постійною зміною декількох показників, що характеризують стан атмосфери вантажного танка, а також перебіг процесу інертизації. Основними з цих показників є концентрація інертного газу та залишків вантажу в об'ємі

вантажного танка; стан розділювального шару, який запобігає сумішутворенню між парами вантажу, що залишились у вантажному танку, та інертним газом, що подається до вантажного танку; тиск інертного газу; тривалість інертизації.

2. Якісним показником процесу інертизації вантажних танків суден-газовозів є концентрація інертного газу в атмосфері вантажного танка; кількісним – тривалість інертизації.

3. Якісне проведення процесу інертизації можливе лише за підтримання суцільності розділювального шару, що запобігає сумішутворенню між парами вантажу, які залишились у вантажному танку, та інертним газом, який подається до вантажного танка. Діагностування стану розділювального шару найбільш доцільно виконувати за аналізом стану атмосфери вантажного танка (а саме через визначення концентрації інертного газу та залишків вантажу за різної висоти вантажного танка). Монотонна зміна значень цих показників та досягнення ними максимального або мінімального значення свідчить про цілісність розділювального шару та відсутність неприпустимого сумішутворення між інертним газом і парами залишків вантажу. Забезпечення цих умов сприяє проведенню процесу інертизації з мінімальними енергетичними витратами та мінімальною тривалістю.

4. Експериментально підтверджено наявність надкритичного тиску інертного газу, перевищення якого призводить до руйнування розділювального шару, який запобігає сумішутворенню між парами вантажу, що залишились у вантажному танку, та інертним газом, що подається до вантажного танка. Визначення цього негативного явища можливе через моніторинг концентрації інертного газу на різних рівнях вантажного танка. Експериментальні дослідження, що були виконані на суднах-газовозах вантажомісткістю 38646 м³, 42563 м³, 88248 м³, 145673 м³ та 162233 м³, дозволили визначити цей тиск та надати практичні рекомендації щодо його запобігання. Також для кожного з суден-газовозів із вказаною вантажомісткістю було визначено оптимальний з точки зору забезпечення

якісного та кількісного показників процесу інертизації тиск інертного газу, що подається до вантажного танка.

5. Енергетичну ефективність процесу інертизації вантажних танків суден-газовозів доцільно оцінювати за значеннями відносної витрати азоту (як інертного газу), відносної тривалості інертизації, відносної витрати енергії на роботи допоміжного обладнання, яке використовується для забезпечення інертизації. Експериментальні дослідження, які виконувались на суднах-газовозах вантажомісткістю 38646 м³, 42427 м³, 42563 м³, 72312 м³, 88248 м³, 88274 м³, 88302 м³, 145673 м³, 146817 м³, 162233 м³, визначили, що серед основних існуючих схем інертизації вантажних приміщень суден-газовозів (якими є каскадна, паралельна та напівкаскадна) найбільш оптимальною з погляду забезпечення енергетичної ефективності є каскадна схема інертизації, далі слідує паралельна та напівкаскадна. Вибір схеми інертизації залежить від рейсового завдання, вимог берегової адміністрації та можливостей порту-розвантаження щодо забезпечення судна азотом, а також характеристик суднової системи генерації інертних газів.

6. Екологічну ефективність процесу інертизації вантажних танків суден-газовозів доцільно оцінювати за значеннями потужності генератора інертних газів, часу роботи генератора інертних газів, об'єму вуглекислого газу, який утворюється за час інертизації. Порівняння показників, що характеризують екологічність процесу інертизації вантажних танків суден-газовозів вантажомісткістю 38646 м³, 88248 м³ та 145673 м³, визначили, що для суден будь-якої вантажомісткості найкращі екологічні показники досягаються за умови проведення процесу інертизації за каскадною схемою. Використання паралельної та напівкаскадної схем інертизації призводить до 1,19...1,7-ти кратного зменшення часу роботи генератора інертних газів, але за цих умов спостерігається 1,38...2,11-ти кратне збільшення потужності генератора азоту та 1,15...1,24-ти кратне збільшення об'єму діоксидів вуглецю, що потрапляє в довкілля під час забезпечення процесу інертизації.

7. Технологія подачі інертних газів у вантажні танки суден-газовозів повинна виконуватися за розробленою проєктувальниками і схваленою та узгодженою з фрахтувальниками схемою. При цьому у випадку підтримання необхідних значень параметрів інертного газу, що подається до вантажних танків, та безперервного контролю атмосфери вантажних танків можливе виконання модернізації системи подачі інертних газів. Ця модернізація не повинна сприяти зменшенню обсягу вантажу, що знаходиться та транспортується у вантажному танку, а також повинна не впливати на необхідний рівень пожежної безпеки атмосфери вантажного танка. Досягнення цих умов з одночасним виконанням вказаних обмежень можливе шляхом встановлення у верхній частині вантажного танка додаткової параболоподібної відбійної поверхні. Внутрішній параболоподібний профіль цієї поверхні забезпечує виникнення додаткового розпаду та гасіння струменя інертного газу, що потрапляє до вантажного танка. Це сприяє переспрямуванню потоку інертного газу, зменшенню його швидкості та знижує локальний (зонний) тиск з боку інертного газу на розділювальний шар, що знаходиться всередині вантажного танка. Забезпечення цих технологічних дій дозволяє збільшити тиск нагнітання інертного газу, що спрямовується до вантажного танка з одночасним підтриманням суцільності розділювального шару та зменшенням тривалості процесу інертизації.

8. Дослідження, що були виконані на суднах-газовозах вантажомісткістю до 50000 м^3 , $50000 \dots 100000 \text{ м}^3$ та більше за 100000 м^3 , встановили, що використання запропонованої технології дозволяє вироблення інертного газу з максимально можливим тиском нагнітання (який на $7 \dots 10 \%$ перевищує значення експлуатаційного тиску) та $20 \dots 30 \%$ скорочує тривалість процесу інертизації вантажних танків. Визначимо, що підвищення тиску нагнітання інертного газу сприяє збільшенню його витрати, при цьому потужність генератора інертних газів зростає на $10 \dots 60 \text{ кВт}$ (або на $1 \dots 4 \%$) залежно від вантажомісткості судна-газовоза. При цьому це зростання не суттєво впливає на загальне навантаження судових дизель-генераторів, середньостатистична

потужність яких під час проведення дослідження знаходилась у межах 850...1100 кВт для суден-газовозів вантажомісткістю до 50000 м³; 1650...1900 кВт для суден-газовозів вантажомісткістю 50000...100000 м³; 2350...2700 кВт для суден-газовозів вантажомісткістю більше за 100000 м³.

9. Використання запропонованої модернізованої системи інертизації вантажних танків сприяє підвищенню енергетичної ефективності процесу інертизації. При цьому для суден-газовозів з різною вантажомісткістю та різною схемою подачі інертних газів до вантажних танків забезпечується зниження витрати азоту (який використовується як інертний газ), зниження тривалості процесу інертизації та зменшення енергетичних витрат на процес інертизації.

10. Зменшення тривалості процесу інертизації під час використання модернізованої системи сприяє зменшенню шкідливих викидів у довкілля, утворення яких пов'язане з роботою теплових двигунів, що забезпечують потужністю генератори інертних газів. Зокрема при цьому для суден-газовозів різної вантажомісткості забезпечується зниження викидів діоксиду вуглецю на 15,6...26,8 %, що сприяє збільшенню екологічної ефективності процесу інертизації вантажних танків.

11. Управління суцільністю та рухом розділювального шару (який запобігає сумішутворенню між парами вантажу, що залишились у вантажному танку, та інертним газом, що подається до вантажного танка) досягається переспрямуванням потоку інертного газу з одночасним контролем його концентрації по всьому об'єму вантажного танка.

12. Практичне значення результатів проведених досліджень полягає в можливості їх використання на судах-газовозах будь-якої вантажомісткості, інертизація вантажних танків яких виконується за найбільш розповсюдженими схемами – каскадною, паралельною, напівкаскадною.

13. Розроблені технології з визначення стану атмосфери вантажних танків суден-газовозів; з визначення енергетичної та екологічної ефективності методів інертизації вантажних танків суден-газовозів; з

діагностування суцільності розділювального шару, який запобігає сумішутворенню між парами вантажу, що залишились у вантажному танку, та інертним газом, який подається до вантажного танка, були впроваджені на судах-газовозах різної вантажомісткості. Завдяки цьому досягалося зменшення навантаження на судову електростанцію та скорочувався час експлуатації допоміжного обладнання, яке використовувалось під час інертизації; а також забезпечувалось проведення процесу інертизації з найбільшою енергетичною та екологічною ефективністю.

14. Наведені результати дозволяють сформулювати таке наукове положення. Оптимізація процесу інертизації вантажних танків суден-газовозів (за енергетичною ефективністю та екологічною безпекою) досягається шляхом керованого впливу на розділювальний шар, який запобігає сумішутворенню між парами вантажу, що залишились у вантажному танку, та інертним газом, що подається до вантажного танка, чому сприяє переспрямування потоків інертного газу, який подається у верхню частину вантажного танка.

Наукові результати, що отримані в дисертаційному дослідженні, теоретично обґрунтовані та підтверджені під час проведення експериментів у системах інертизації вантажних приміщень суден-газовозів вантажомісткістю 38646 м³, 42427 м³, 42563 м³, 72312 м³, 88248 м³, 88274 м³, 88302 м³, 145673 м³, 146817 м³, 162233 м³.

ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Sagin S.V. Ensuring the Safety of Maritime Transportation of Drilling Fluids by Platform Supply-Class Vessel / S.V. Sagin, S. Karianskyi, S.S. Sagin, O. Volkov, Y. Zablotskyi, O. Fomin, V. Píštěk, P. Kučera // *Applied Ocean Research*. – 2023. – Vol. 140. – P. 103745. DOI: 10.1016/j.apor.2023.103745.

2. Двуліт З.П. Вдосконалення бізнес-процесів сучасних судноплавних компаній в сфері міжнародних морських вантажних перевезень / З.П. Двуліт, О.М. Тимошук, О.В. Левченко // *Менеджмент та підприємництво в Україні: етапи становлення і проблеми розвитку*. – 2021. – № 3(1). – С. 1–12. DOI: 10.23939/smeu2021.01.001.

3. Budashko V. Improving the method of linear-quadratic control over a physical model of vessel with azimuthal thrusters / V. Budashko, A. Sandler, S. Khniunin // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. – 2023. – Vol. 1. – № 2(121). – P. 49–71. DOI: 10.15587/1729-4061.2023.273934.

4. Sagin S. Ensuring the Environmental Friendliness of Drillships during Their Operation in Special Ecological Regions of Northern Europe / S. Sagin, O. Kuropyatnyk, A. Sagin, I. Tkachenko, O. Fomin, V. Píštěk, P. Kučera // *Journal of Marine Science and Engineering*. – 2022. – Vol. 10. – P. 1331. DOI: 10.3390/jmse10091331.

5. Sagin S. Ensuring Operational Performance and Environmental Sustainability of Marine Diesel Engines through the Use of Biodiesel Fuel / S. Sagin, O. Kuropyatnyk, O. Matieiko, R. Razinkin, T. Stoliaryk, O. Volkov // *Journal of Marine Science and Engineering*. – 2024. – Vol. 12. – P. 1440. <https://doi.org/10.3390/jmse12081440>.

6. Park H. Study on the Estimation Method of Wind Resistance Considering Self-Induced Wind by Ship Advance Speed / H. Park, P. Lee, J. Kim, H. Kim, H. Lee, Y. Lee // *Journal of Marine Science and Engineering*. – 2024. – Vol. 12. – P. 1694. <https://doi.org/10.3390/jmse12101694>.

7. Chun K.W. Development of a Marine LPG-Fueled High-Speed Engine for Electric Propulsion Systems / K.W. Chun, M. Kim, J.-J. Hur // *Journal of Marine Science and Engineering*. – 2022. – Vol. 10. – P. 1498. <https://doi.org/10.3390/jmse10101498>.

8. Manos A. Investigating the Operation of an LNG Carrier as a Floating Power Generating Plant (FPGP) / A. Manos, D. Lyridis, J. Prousalidis, E. Sofras // *Journal of Marine Science and Engineering*. – 2023. – Vol. 11 – P. 1749. <https://doi.org/10.3390/jmse11091749>.

9. Марченко А.П. Двигуни внутрішнього згоряння і навколишнє середовище / А.П. Марченко, І.В. Парсаданов, О.П. Строков // *Двигуни внутрішнього згоряння*. – 2022. – № 2. – С. 3-12. doi : 10.20998/0419-8719.2022.2.01.

10. Гришук І.В. Особливості визначення витрати палива та викидів шкідливих речовин двигунів транспортних засобів, що працюють на газовому паливі / І.В. Гришук, Д.С. Погорлецький, Д.С. Адров, А.В. Білай // *Двигуни внутрішнього згоряння*. – 2021. – № 1. – С. 25-35. doi : 10.20998/0419-8719.2021.1.04.

11. Сагин С.В. Оптимизация режимов работы системы перепуска выпускных газов судовых среднеоборотных дизелей / С.В. Сагин, А.А. Куропятник // *Автоматизация судовых технических средств : науч. - техн. сб.* – 2019. – Вып. 25. – Одесса: НУ«ОМА». – С. 79-89.

12. Руснак Д.Ю. Забезпечення екологічних вимог при ультразвуковій десульфурізації вуглеводних палив / Д.Ю. Руснак, С.В. Сагін // *Суднові енергетичні установки: наук.-техн. зб.* – 2020. – Одеса: НУ«ОМА» – Вип. 40. – С. 49-54. DOI : 10.31653/smf340.2020.49-54.

13. Park C.-J. Study on Hydroelastic Responses of Membrane-Type LNG Cargo Containment Structure under Impulsive Sloshing Loads of Different Media / C.-J. Park, J.-K. Lee, Y. Kim // *Journal of Marine Science and Engineering*. – 2024 – Vol. 12. – P. 1794. <https://doi.org/10.3390/jmse12101794>.

14. Elrhoul D. Thermo-Economic Comparison between Three Different Electrolysis Technologies Powered by a Conventional Organic Rankine Cycle for the Green Hydrogen Production Onboard Liquefied Natural Gas Carriers / D. Elrhoul, M. Naveiro, M. Romero Gómez // *Journal of Marine Science and Engineering*. – 2024. – Vol. 12. – P. 1287. <https://doi.org/10.3390/jmse12081287>.

15. Historical Records of LNG Prices 1990–2023. Available online: <https://tradingeconomics.com/commodity/natural-gas>.

16. Fernández I.A. Review of propulsion systems on LNG carriers. / I.A. Fernández, M.R. Gómez, J.R. Gómez, Á.B. Insua // *Renewable Sustention Energy Reviews*. – 2017. – Vol.67. – P. 1395–1411.

17. Li H.-C. Improving Aquaculture Water Quality Using Dual-Input Fuzzy Logic Control for Ammonia Nitrogen Management / H.-C. Li, K.-W. Yu, C.-H. Lien, C. Lin, C.-R. Yu, S. Vaidyanathan // *Journal of Marine Science and Engineering*. – 2023. – Vol. 11. – P. 1109. <https://doi.org/10.3390/jmse11061109>.

18. Peruško D. Ageing of Liquified Natural Gas during Marine Transportation and Assessment of the Boil-Off Thermodynamic Properties / D Peruško, D. Karabaić, I. Bajsić, J. Kutin // *Journal of Marine Science and Engineering*. – 2023. – Vol. 11. – P. 1980. <https://doi.org/10.3390/jmse11101980>.

19. Sepulcre S. Assessing the Calibration of Benthic Foraminifera Elemental Ratios from the Northeastern Atlantic / S Sepulcre, M. Tribondeau, F. Bassinot, M. Mojtahid, M.-P. Nardelli, P.-A. Dessandier, J. Bonnin // *Journal of Marine Science and Engineering*. – 2024. – Vol. 12. – P. 736. <https://doi.org/10.3390/jmse12050736>.

20. Kim D. Exploring the Impact of Palladium Loading on Pd-Based Three-Way Catalyst Performance and Propane Reactivity for Emission Reduction in Liquefied Petroleum Gas Engines / D. Kim // *Journal of Marine Science and Engineering*. – 2023. – Vol. 11. – P. 2187. <https://doi.org/10.3390/jmse11112187>.

21. Сагін С.В. Оцінка безвідмовності суднових дизелів за технічним станом моторного мастила циркуляційних систем мащення / С.В. Сагін,

С.А. Бондар, Т.О. Столярик // Водний транспорт. – 2023. – № 1 (37). – С. 59–70. DOI: 10.33298/2226-8553.2023.1.37.06.

22. Сагін С.В. Контроль та діагностування надійності та економічності дизелів морських та річкових засобів транспорту / С.В. Сагін, А.С. Сагін // Суднові енергетичні установки : наук.-техн. зб. – 2023. – Вип. 46. – Одеса: НУ«ОМА». – С. 118–131. DOI: 10.31653/smf46.2023.118-131.

23. Сагін С.В. Метод попередження аварійних ситуацій під час експлуатації суднових дизелів за аналізом потоку відмов його основних вузлів / С.В. Сагін, С.А. Бондар // Суднові енергетичні установки : наук.-техн. зб. – 2023. – Вип. 46. – Одеса: НУ«ОМА». – С. 101–109. DOI: 10.31653/smf46.2023.101-109.

24. Малахов А.В. Метод принудительной вентиляции трюмов на танкерах / А.В. Малахов, М.А. Коллегаев, И.Д. Бражник // Вчені записки Таврійського національного університету ім. В. І. Вернадського. Серія «Технічні науки». – 2018. – Т. 29(68). – № 3. – С. 166-169.

25. Sagin S. Ensuring the environmental friendliness of marine diesel engines of specialized ships / S. Sagin, O. Kuropyatnyk, I. Tkachenko // Суднові енергетичні установки : наук.-техн. зб. – 2022. – Вип. 45. – Одеса: НУ«ОМА». – С. 142–156. DOI: 10.31653/smf44.2022.142-156.

26. Тимощук О.М. Дослідження методів підвищення екологічності суднових енергетичних установок у водному середовищі / О.М. Тимощук, М.В. Боріна // Водний транспорт. Збірник наукових праць. – 2022. – Вип. 2(36). – С. 240–252. DOI: 10.33298/2226-8553/2022.2.36.21.

27. Fagerholt K. A decision support methodology for strategic planning in maritime transportation / K. Fagerholt, M. Christiansen, L.M. Hvattum, T.A.V. Johnsen, T.J. Vabø // Omega. – 2010. – № 38. – Р. 465-474.

28. Головань А.І. Концептуальна модель планування та оптимізації графіків технічного обслуговування вантажних суден. // Водний транспорт. Збірник наукових праць. – 2023. – Вип. 1(37). – С. 107-115. doi.org/10.33298/2226-8553.2023.1.37.12.

29. Сагін С.В. Метод управління факторами ризику виникнення аварійних ситуацій під час експлуатації пропульсивних комплексів засобів водного транспорту / С.В. Сагін, Р.В. Побережний // Суднові енергетичні установки : наук.-техн. зб. – 2023. – Вип. 46. – Одеса: НУ«ОМА». – С. 110–117. DOI: 10.31653/smf46.2023.110-117.

30. Kondratenko Y.P. Topalov A.M., Kozlov O.V. Simulation of the Initial Stability of the Floating Dock for the List and Trim Stabilization Tasks // Problems of the Regional Energetics. – 2019. – Vol. 1-2(41). – P. 12-24. DOI: 10.5281/zenodo.3239200.

31. Xuan H. Decision-Making on the Selection of Clean Energy Technology for Green Ships Based on the Rough Set and TOPSIS Method / H. Xuan, Q. Liu, L. Wang, L. Yang // Journal of Marine Science and Engineering. – 2022. – Vol. 10. – P. 579. [https://doi.org/ 10.3390/jmse10050579](https://doi.org/10.3390/jmse10050579).

32. Park S.W. Explosion Characteristics of Hydrogen Gas in Varying Ship Ventilation Tunnel Geometries: An Experimental Study / S.W. Park, J.H. Kim, J.K. Seo // Journal of Marine Science and Engineering. – 2022. – Vol. 10. – P. 532. <https://doi.org/10.3390/jmse10040532>.

33. Lee K. Development of Hardware-in-the-Loop Simulation Test Bed to Verify and Validate Power Management System for LNG Carriers / K. Lee // Journal of Marine Science and Engineering. – 2024. – Vol. 12. – P. 1236. <https://doi.org/10.3390/jmse12071236>.

34. Bogdevicius M. Impact and Technical Solutions of Hydrodynamic and Thermodynamic Processes in Liquefied Natural Gas Regasification Process / M. Bogdevicius, V. Semaskaite, T. Paulauskiene, J. Uebe // Journal of Marine Science and Engineering. – 2024. – Vol. 12. – P. 1164. <https://doi.org/10.3390/jmse12071164>.

35. 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. DOI: 10.15587/2312-8372.2018.152255.

36. Сагін С.В. Визначення методу управління рухом суден морського транспорту під час забезпечення їх безпечного розходження / С.В. Сагін, С.С. Сагін // Водний транспорт. – 2023. – № 2 (38). – С. 187–197. DOI: 10.33298/2226-8553.2023.2.38.19.

37. Марченко О.О. Вдосконалення процесу очищення суднових важких палив / О.О. Марченко, С.В. Сагін // Суднові енергетичні установки: наук.-техн. збірник. – 2020. – Одеса: НУ«ОМА». – Вип. 41. – С. 10-14. DOI: 10.31653/smf341.2020.10-14.

38. Varbanets R. Acoustic Method for Estimation of Marine Low-Speed Engine Turbocharger Parameters / R. Varbanets etc. Journal of Marine Science and Engineering. – 2021. – Vol. 9. – P. 321. [https://doi.org/ 10.3390/jmse9030321](https://doi.org/10.3390/jmse9030321).

39. Vedyakova A.O. Multi-Purpose law for marine dynamic position system under the influence of sea waves / A.O. Vedyakova // Modern information technologies and IT-education. – 2020. – Vol. 16. – Iss. 1. – P. 72-80. DOI: 10.25559/SITITO.16.202001.72-80.

40. Сагін С.В. Робота суднового дизеля на біодизельному паливі / С.В. Сагін, В.В. Мадей, А.С. Сагін // Автоматизація суднових технічних засобів : наук.-техн. зб. – 2021. – Вип. 27. – Одеса: НУ«ОМА». – С. 93–107. DOI: 10.31653/1819-3293-2021-1-27-93-107.

41. Budashko V. Thrusters physical model formalization with regard to situational and identification factors of motion modes / V. Budashko // International journal of energy and environment. – 2020. – V. 14. – P. 5–8. DOI: 10.46300/91012.2020.14.2.

42. Budashko V. Solving a task of coordinated control over a ship automated electric power system under a changing load / V. Budashko, V. Shevchenko // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2021. – Vol. 2. – № 2(110). – P. 54–70. DOI: 10.15587/1729-4061.2021.229033.

43. Бражнік І.Д. Изменение рабочих характеристик системы инертизации танкера за счет принудительной подачи газов / И.Д. Бражник // Науковий

вісник Херсонської державної морської академії. Наковий журнал. – 2019. – № 1(20). – Херсон: ХДМА. – С. 4-11.

44. Сагін С.В., Матейко О.В. Аналіз способів інертизації вантажних танків суден-газовозів // Суднові енергетичні установки : науково-технічний збірник. – 2023. – Вип. 47. – Одеса: НУОМА. – С. 148-156. doi: 10.31653/smf47.2023.148-156.

45. Сагін С.В., Матейко О.В. Особливості інертизації вантажних танків під час перевезення вогнебезпечних речовин // Водний транспорт. Збірник наукових праць. – 2024. – Вип. 2(40). – С. 36-49. doi.org/10.33298/2226-8553.2024.2.40.03.

46. 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.

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

48. Sviličič Š. Comparative FEM Analysis of Vacuum and Perlite Insulation Techniques on the Structural Integrity of Independent Type C Liquefied Natural Gas Tank / Š. Sviličič, S. Rudan, H. Galič, E. Weigand, V. Slapničar // Journal of Marine Science and Engineering. – 2024. – Vol. 12. – P. 1027. <https://doi.org/10.3390/jmse12061027>.

49. Yang L. Thermo-Mechanical Coupling Analysis of the Sealing Structure Stress of LNG Cryogenic Hose Fittings / L. Yang, M. Liu, Y. Liu, T. Zhang, H. Lu, Q. Lu, J. Yan // Journal of Marine Science and Engineering. – 2024. – Vol. 12. – P. 581. <https://doi.org/10.3390/jmse12040581>.

50. Li Y. A Simulation Model of the Influence of LNG Ships on Traffic Efficiency at Tianjin Port / Y. Li, W. Tian, B. Meng, J. Zhang, R. Zhou // Journal of Marine Science and Engineering. – 2024. – Vol. 12. – P. 405. <https://doi.org/10.3390/jmse12030405>.

51. Yang X. Thermo-Economic Analysis and Multi-Objective Optimization of a Novel Power Generation System for LNG-Fueled Ships / X. Yang, J. Zou, Q. Lei, X. Lu, Z. Chen // Journal of Marine Science and Engineering. – 2023. – Vol. 11. – P. 2219. <https://doi.org/10.3390/jmse11122219>.

52. Roslan S.B. Rule-Based Control Studies of LNG–Battery Hybrid Tugboat / S.B. Roslan, Z.Y. Tay, D. Konovessis, J.H. Ang, N.V. Menon // Journal of Marine Science and Engineering. – 2023. – Vol. 11. – P. 1307. <https://doi.org/10.3390/jmse11071307>.

53. Migliore C.C. Weathering prediction model for stored liquefied natural gas (LNG) / C.C. Migliore, C. Tubilleja, V. Vesovic // Journal of Natural Gas Science and Engineering. – 2015. – Vol.26. – P. 570–580.

54. Xiao X. Research on a Novel Combined Cooling and Power Scheme for LNG-Powered Ship / X. Xiao, X. Xu, Z. Wang, C. Liu, Y. He // Journal of Marine Science and Engineering. – 2023. – Vol. 11. – P. 592. <https://doi.org/10.3390/jmse11030592>.

55. Kim D.M. Fault Simulating Test Bed for Developing Diagnostic Algorithm of the Geared Rotating Machinery of Ships / D.M. Kim, S.H. Kim, H.M. Song, S.J. Kim // Journal of Marine Science and Engineering. – 2024. – Vol. 12. – P. 917. <https://doi.org/10.3390/jmse12060917>.

56. Liu F. Cross-Scale Reliability Analysis Framework for LNG Storage Tanks Considering Concrete Material Uncertainty / F. Liu, J. Ma, Z. Ye, L. Wang, Sun Y. J. Yu, Y. Qin, D. Zhang, W. Cai, H. Li // Journal of Marine Science and Engineering. – 2024. – Vol. 12. – P. 276. <https://doi.org/10.3390/jmse12020276>.

57. Lebedevas S. The Application of Cryogenic Carbon Capture Technology on the Dual-Fuel Ship through the Utilisation of LNG Cold Potential / S. Lebedevas, A. Malukas // Journal of Marine Science and Engineering. – 2024. – Vol. 12. – P. 217. <https://doi.org/10.3390/jmse12020217>.

58. Peruško D. Ageing of Liquefied Natural Gas during Marine Transportation and Assessment of the Boil-Off Thermodynamic Properties / D. Peruško,

D. Karabai'c, I. Bajsi'c, J. Kutin // Journal of Marine Science and Engineering. – 2023. – Vol. 11. – P. 1980. <https://doi.org/10.3390/jmse11101980>.

59. Колегаєв М.О. Обробка палива в системі інертних газів танкера / М.О. Колегаєв, І.Д. Бражнік // 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.

60. Сагін С. В., Матейко О. В. Оптимізація процесу дегазації вантажних танків нафтогазовозів // Матеріали 12-ї Міжнародної науково-практичної конференції «Сучасні енергетичні установки на транспорті і технології та обладнання для їх обслуговування», 06-08 вересня 2021 р. – Херсон: Херсонська державна морська академія. – 2021. – С. 152-153.

61. Сагін С.В. Аналіз екологічної стійкості та енергетичної ефективності використання скрубберного очищення випускних газів дизелів суден морського транспорту / С.В. Сагін, В.В. Мадей, С.С. Сагін, В.І. Чимшир, Р.О. Разінкін // Суднові енергетичні установки : наук.-техн. зб. – 2023. – Вип. 47. – Одеса: НУ «ОМА». – С. 157–171. DOI: 10.31653/smf47.2023.157-171.

62. Zhongbin Z. Fleet Deployment Optimization for LNG Shipping Vessels Considering the Influence of Mixed Factors / Z. Zhongbin, W. Xifu, W. Hao, C. Suxin, L. Wei // Journal of Marine Science and Engineering. – 2022. – Vol.10. – P. 2034.

63. 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.

64. Aditya N.D. Development of small vessel advisory and forecast services system for safe navigation and operations at sea / N.D. Aditya, K.G. Sandhya, R. Harikumar, T.M. Balakrishnan // Journal of Operational Oceanography. – 2022. – Vol. 15(1). – P. 52-67. DOI: 10.1080/1755876X.2020.1846267.

65. Назаренко В.М. Математична модель прогнозу значень основних характеристик морехідного стану танкера після завантаження / В.М. Назаренко, В.Д. Савчук // Судноводіння. – 2023. – № 35. – С. 104-115. DOI: 10.31653/2306-5761.35.2023.104-115.

66. Михайлов С.А. Электронные анализаторы газовой среды для автономных судов / С.А. Михайлов, И.М. Викулин, Н.С. Михайлов // Судноводіння. – 2021. – № 31. – С. 44-52. DOI: 10.31653/2306-5761.31.2021.44-52.

67. Сагін С.В., Матейко О.В. Аналіз схем інертизації вантажних танків спеціалізованих суден під час використання азоту // Збірник матеріалів IV міжнародної науково-практичної конференції: Дніпровські читання-2023, 7 грудня 2023 р. – Київ: Київський інститут водного транспорту імені гетьмана Петра Конашевича-Сагайдачного Державного університету інфраструктури та технологій. – 2023. – С. 86-90.

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

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

70. Сагін С.В. Зниження ризиків інвазійного забруднення морських акваторій під час експлуатації суден морського та внутрішнього водного транспорту / С.В. Сагін, М.О. Колегаєв, Д.Г. Парменова // Суднові енергетичні установки : наук.-техн. зб. – 2023. – Вип. 47. – Одеса: НУ«ОМА». – С. 131–147. DOI: 10.31653/smf47.2023.131-147.

71. Sagin S.V. The Use of Exhaust Gas Recirculation for Ensuring the Environmental Performance of Marine Diesel Engines / S.V. Sagin, O.A. Kuropyatnyk // *Nase More : International Journal of Maritime Science & Technology*. – 2018. – Vol. 65. – № 2. – P. 78-86. doi.org/10.17818/NM/2018/2.3.

72. Бражник И.Д. Модернизация процесса инертизации грузовых танков на танкерах / И.Д. Бражник, М.А. Колегаев, А.В. Малахов, А.В. Кирис, Б.А. Гарагуля // *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.

73. Матейко О.В. Оцінка якості перебігу процесу інертизації вантажних танків суден-газовозів / О.В. Матейко // *Збірник матеріалів Міжнародної мультидисциплінарної наукової інтернет-конференції «Світ наукових досліджень»*. 22-23 жовтня 2024 р. Вип. 34: м. Тернопіль, Україна, м. Ополе, Польща. – 2024. – С. 162-166. <https://www.economy-confer.com.ua/full-article/5792>.

74. Сагін С.В. Розробка методу оцінки ризиків виникнення аварійних подій під час експлуатації дизелів морських суден / С.В. Сагін, П.С. Суворов, С.А. Бондар // *Суднові енергетичні установки : наук.-техн. зб.* – 2023. – Вип. 47. – Одеса: НУ«ОМА». – С. 122–130. DOI: 10.31653/smf47.2023.122-130.

75. Шумілова К.В. Управління індивідуальними навігаційними ризиками рейсового циклу морського судна / К.В. Шумілова, А.С. Мальцев // *Судноводіння*. – 2022. – № 33. – С. 128-142. DOI: 10.31653/2306-5761.33.2022.128-142.

76. Торський В.Г. Ергономічні аспекти безпеки при експлуатації суден / В.Г. Торський, В.П. Топалов, В.В. Торський // *Судноводіння*. – 2021. – № 31. – С. 69-79. DOI: 10.31653/2306-5761.31.2021.69-79.

77. Побережний Р.В. Забезпечення екологічних показників дизелів суден річкового та морського транспорту / Р.В. Побережний, С.В. Сагін // *Суднові енергетичні установки: наук.-техн. збірник*. – Одеса: НУ«ОМА». – 2020. – Вип. 41. – С. 5-9. DOI: 10.31653/smf340.2020.5-9.

78. Sagin S. V. Supplying of Marine Diesel Engine Ecological Parameters / S.V. Sagin, O.A. Kuropyatnyk, Yu.V. Zablotskyi, O.V. Gaichenia // *Nase More: International Journal of Maritime Science & Technology*. – 2022. – Vol. 69. – Iss. 1. – P. 53–61. DOI: 10.17818/NM/2022/1.7.

79. Sagin S.V. Use of Biofuels in Marine Diesel Engines for Sustainable and Safe Maritime Transport / S.V. Sagin, S.S. Sagin, O. Fomin, O. Gaichenia, Y. Zablotskyi, V. Píšťek, P. Kučera // *Renewable Energy*. – 2024. – Vol. 224. – P. 120221. DOI: 10.1016/j.renene.2024.120221.

80. Matieiko O. Selection of optimal schemes for the inerting process of cargo tanks of gas carriers / O. Matieiko // *Technology Audit and Production Reserves*. – 2024. – №4(1(78)). – С. 43–50. <https://doi.org/10.15587/2706-5448.2024.310699>.

81. Малахов А.В. Совершенствование эксплуатационных показателей системы инертных газов на танкерах / А.В. Малахов, М.А. Коллегаев, И.Д. Бражник // *Вісник Херсонського національного технічного університету*. – 2018. – Вип. 2(65). – С. 27–34.

82. Міжнародна конвенція з охорони людського життя на морі 1974 року / *International Convention for the Safety of Life at Sea, 1974 (SOLAS 1974)* з поправками. Міністерство інфраструктури України: веб-сайт. URL: <https://docs.google.com/viewer?embedded=true&url=https://mtu.gov.ua/files/%D0%86MO%20act%208%2007%2018.docx>.

83. Голіков В.А. Розвиток сучасної теорії і практики технічної експлуатації морського і річкового флоту: концепції, методи, технології / В.А. Голіков, О.А. Онищенко // *Суднові енергетичні установки : наук.-техн. зб.* – 2017. – Вип. 37. – Одеса : НУ «ОМА». – С. 13-27.

83. Коллегаєв М.О. Технологічна схема модернізації системи подачі інертних газів у вантажні приміщення танкерів / М.О. Коллегаєв, 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.

84. Boodoo C. Post-Pandemic Natural Gas Utilization in Trinidad and Tobago: A Sectoral Analysis (2020–2023) / C. Boodoo // *European Journal of Energy Research*. – 2024. – Vol. 4. – P. 20–33. doi:10.24018/ejenergy.2024.4.1.134.

84. Малахов О.В. Характеристики процесу тепло-масопереносу в застосуванні до вентиляції інертними газами вантажних трюмів танкерів / О.В. Малахов, М.О. Колегаєв, І.Д. Бражнік, 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.

85. Колегаєв М.О. Исследование процессов принудительной подачи инертных газов в грузовые помещения танкера / М.О. Колегаєв, І.Д. Бражнік // *Матеріали науково-технічної конференції «Річковий та морський флот: експлуатація і ремонт» 22.03.2018–23.03.2018.* – Одеса. – НУ «ОМА». – С. 132–137.

86. Бражнік І.Д. Совершенствование системы подачи инертных газов на танкерах / І.Д. Бражнік, М.А. Колегаєв // *Матеріали науково-технічної конференції молодих дослідників «Суднові енергетичні установки: експлуатація та ремонт» 14.12.2017.* – Одеса. – НУ «ОМА». – С. 150–152.

87. Матейко О.В. Визначення критерію оцінки якості перебігу процесу інертизації вантажних танків суден-газовозів / О.В. Матейко // *Збірник матеріалів Науково-технічної конференції молодих дослідників «Суднові енергетичні установки: експлуатація та ремонт», 21.11.2024.* – Одеса: НУОМА. – 2024. – С. 54-59.

88. Сагін С. В. Аналіз основних способів зниження емісії оксидів азоту дизелів суден морського та внутрішнього водного транспорту / С.В. Сагін, Р.В. Побережний // *Суднові енергетичні установки : наук.-техн. зб.* – 2022. – Вип. 44. – Одеса: НУ «ОМА». – С. 132–141. DOI: 10.31653/smf44.2022.132-141.

89. Тимощук О.М. Дослідження безпеки бункерування на водному транспорті / О.М. Тимощук, О.В. Мельник // Водний транспорт. Збірник наукових праць. – 2020. – Вип. 1(29). – С. 5–13. DOI: 10.33298/2226-8553/2020.1.29.01.

90. Тимощук О.М. Оптимізація заходів безпеки при бункеруванні суден / О.М. Тимощук, О.В. Мельник // Водний транспорт. Збірник наукових праць. – 2021. – Вип. 2(33). – С. 36–43. DOI: 10.33298/2226-8553/2021.2.33.04.

91. Колегаєв М.О. Забезпечення процесу інертизації вантажних приміщень нафтових танкерів за допомогою системи інертних димових газів / М.О. Колегаєв, І.Д. Бражнік // Суднові енергетичні установки : наук.-техн. зб. – 2024. – Вип. 48. – Одеса: НУОМА. – С. 46–53. DOI: 10.31653/smf48.2024.46-53.

92. Сагін А.С. Аналіз ефективності морських перевантажувальних терміналів під час транспортування зрідженого природного газу суднами-газовозами / А.С. Сагін, Ю.В. Заблоцький // Суднові енергетичні установки : науково-технічний збірник. – 2024. – Вип. 48. – Одеса : НУОМА. – С. 114–125. DOI: 10.31653/smf48.2024.114-125.

93. Budashko V. Diagnosis of the Technical Condition of High-tech Complexes by Probabilistic Methods / V. Budashko, A. Sandler, V. Shevchenko // International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation (TransNav). – 2022. – Vol. 16. – № 1. – P. 105–111. DOI: 10.12716/1001.16.01.11.

94. Будашко В.В. Аналіз термодинамічних циклів охолодження природного газу під час його транспортування морськими суднами-газовозами / В.В. Будашко, Ю.В. Заблоцький // Суднові енергетичні установки : науково-технічний збірник. – 2024. – Вип. 48. – Одеса : НУОМА. – С. 18–30. DOI: 10.31653/smf48.2024.18-30.

95. Дакі О.А., Плїта Л.Л., Трофименко І.В., Федунів В.М. Особливості та вимоги щодо навігаційного забезпечення безпеки судноводіння на внутрішніх судноплавних шляхах // Водний транспорт. Збірник наукових

праць. – 2022. – Вип. 2(36). – С. 184-194. doi.org/10.33298/2226-8553.2022.2.36.15.

96. Гончарук І.П., Никифоров Ю.О., Кошарська Л.В., Головань А.І. Особливості впливу відновлюваної енергетики на ефективність і екологічність морського транспорту. // Водний транспорт. Збірник наукових праць. – 2023. – Вип. 2(38). – С. 73-80. doi.org/10.33298/2226-8553.2023.2.38.08.

97. 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.

98. Malahov O.V. Main principles of determining the working section and length of ship's flexible pipelines / O.V. Malahov, M.O. Kolegaev, O.B. Kiris, I.Z. Maslov // Суднові енергетичні установки : наук.-техн. зб. – 2021. – Вип. 43. – Одеса: НУ«ОМА». – С. 88–94. DOI: 10.31653/smf343.2021.88-94.

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

100. Ponomaryova V. Devising an approach for the automated restoration of shipmaster's navigational qualification parameters under risk conditions / V. Ponomaryova, P. Nosov, A. Ben, I. Popovych, Y. Prokopchuk, P. Mamenko, S. Dudchenko, E. Appazov, I. Sokol // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2024. – № 1(3(127)). – P. 6–26. https://doi.org/10.15587/1729-4061.2024.296955.

101. Vorokhobin I. Determination of the Law of Probability Distribution of Navigation Measurements / I. Vorokhobin, A. Golikov, O. Haichenia, V. Sikirin, V. Severin / Kaunas, Lithuania. – 2020.– P. 707-710.

102. Wu Y. Review of Path Planning Methods for Marine Autonomous

Surface Vehicles / Y. Wu, T. Wang, S.A. Liu // J. Mar. Sci. Eng. – 2024. – 12,833.
<https://doi.org/10.3390/jmse12050833>.

103. Голіков В.А. Методологія наукових досліджень : навчальний посібник / В.А. Голіков, М.А. Козьмініх, О.А. Онищенко. – Одеса : Одес. нац. мор. академія, 2014. – 164 с.

104. Брикова Т.М. Основи наукових досліджень [Електронний ресурс] : навч. посібник / Т.М. Брикова, О.Г. Терешкін. – Електронне видання. – Х.: ХДУХТ. – 2020. – 104 с.

105. Данильян О. Г. Організація та методологія наукових досліджень : навчальний посібник / О. Г. Данильян, О. П. Дзьобань. – Харків : Право, 2017. – 448 с.

106. Носачова Ю.В. Основи наукових досліджень: підручник / Ю. В. Носачова, Я.В. Радовенчик. – К.: Видавничий дім «Кондор», 2020. – 132 с.

107. Партирко З.В. Основи наукових досліджень: підготовка дисертації : навч. Посібник / З.В. Партирко. – 2-ге вид., перероб. і доп. – К.: Видавництво Ліра-К, 2017. – 232 с.

108. Конверський А.Є. Основи методології та організації наукових досліджень: навчальний посібник /за ред. А. Є. Конверського. – К.: Центр учбової літератури, 2010. – 353 с.

109. Корбутяк В.І. Методологія системного підходу та наукових досліджень: навчальний посібник / В. І. Корбутяк. – Рівне: НУВГП, 2010. – 176 с.

110. Основи методології та організації наукових досліджень: Навч. посіб. для студентів, курсантів, аспірантів і ад'юнтів / за ред. А.Є. Конверського. – К.: Центр учбової літератури, 2010. – 352 с.

111. Даренський О.М. Основи наукових досліджень / О.М. Даренський, Д.А. Фаст, Д.О. Потапов. – Харків : Укр. держ. ун-т залізн. тр- ту, 2016. – 73 с.

112. Alam M. Combustion and emissions performance of low sulfur, ultra low sulfur and biodiesel blends in a DI diesel engine / M. Alam, J. Song, R. Acharya, A. Boehman, K. Miller // SAE transactions. – 2004. – P. 1986 – 1997.

113. Pei-Chi W. Strategies for the low sulfur policy of IMO – an example of a container vessel sailing through a European route / W. Pei-Chi, L. Cherng-Yuan // *Journal of Marine Science and Engineering*. – 2021. – Vol. 9(12). – P. 1383.

114. Deng J. A review of NO_x and SO_x emission reduction technologies for marine Diesel engines and the potential evaluation of liquefied natural gas fuelled vessels / J. Deng, X. Wang, Z. Wei, L. Wang, C. Wang, Z. Chen // *Sci. Total Environ.* – 2021. – Vol. 76. – P. 144319. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.144319>.

115. Бажак О.В. Удосконалення методу оцінки показників надійності обладнання засобів водного транспорту / О.В. Бажак // *Водний транспорт. Збірник наукових праць*. – 2021. – Вип. 3(34). – С. 148-159. doi.org/10.33298/2226-8553/2021.3.34.17.

116. Новохацкий И.А. Метод количественной оценки влияния приповерхностных слоев на вязкое течение полярных молекулярных жидкостей в оксидных капиллярах / И.А. Новохацкий, И.В. Ярошенко, В.П. Шендрик // *Труды Одесского политехнического университета*. – 2006. – Вып. 1(25). – С. 222-224.

117. Васильев А.П. Конвективный теплообмен в ламинарном потоке / А.П. Васильев // *Вестник Одесского гос. ун-та*. – 2003. – № 3. – С. 97-101.

118. Орлов Е.В. Сдвиговая вязкость суспензий твердых сферических частиц / Е.В. Орлов // *Фізика аеродисперсних систем*. – 2020. – № 58. – С. 51-59. DOI: <http://dx.doi.org/10.18524/0367-1631.2020.58.206192>.

119. Цветков Д.О. Малые движения системы из двух вязких стратифицированных жидкостей / Д.О. Цветков // *Таврический вестник информатики и математики*. – • 2016. – № 3(32). – С. 101-109.

120. Цветков Д.О. Операторный подход к задаче о малых движениях стратифицированных жидкостей / Д.О. Цветков // *Таврический вестник информатики и математики*. – 2015. – № 4(29). – С. 77-99.

121. Scurlock R.G. Surface Evaporation of Cryogenic Liquids, Including LNG and LPG. Stratification, Rollover and Handling of LNG, LPG and Other

Cryogenic Liquid Mixtures / R.G. Scurlock. – Springer International Publishing, 2016, pp. 41–62. doi: 10.1007/978-3-319-20696-7_4.

122. Kandoliya P.D. Recent research on cryogenic storage tank: a review / P.D. Kandoliya, N.C. Mehta // International journal for research in applied science & engineering technology (IJRASET). – 2017. – Vol. 5. – № 4. P. 1681–1686.

123. Popovskii A.Y. Structural properties and model rheological parameters of an ELC layer of hexadecane / A.Y. Popovskii, B.A. Altoiz, V.F. Butenko // Journal of Engineering Physics and Thermophysics. – 2019. – № 92(3). – P. 703–710.

124. Altoiz B.A. Equilibrium parameters of a structured n-hexadecane layer / B.A. Altoiz, A.Yu. Popovskii, A.F. Butenko // Фізика аеродисперсних систем. – 2017. – № 54. – С. 35–44.

125. Дакі О.А., Якусевич Ю.Г., Ліганенко В.В., Тришин В.В. Модель системи кондиціювання та охолодження повітря на сучасних нафтоналивних судах і газовозах. // Водний транспорт: Збірник наукових праць. – 2022. – Вип. 1(35). – С. 121–127. doi.org/10.33298/2226-8553.2022.1.35.15.

126. Гунченко В.Ю. Удосконалення системи очищення випускних газів судових дизелів / В.Ю. Гунченко, В.Г. Солодовніков // Суднові енергетичні установки: науково-технічний збірник. Вип. 41. – Одеса: НУ «ОМА». – 2020. – С. 82–87. DOI : 10.31653/smf341.2020.82-87.

127. Куропятник А.А. Управление выпускными газами судовых дизелей для обеспечения экологических показателей / А.А. Куропятник, С.В. Сагин // Автоматизация судовых технических средств: наук.-техн. сборник. – 2018. – Вып. 24. – С. 72–80.

128. Дакі О.А., Якусевич Ю.Г., Тришин В.В., Дороф'єєва З.Я. Розроблення пропозицій щодо декомпозиції судової холодильної установки та математичної моделі компресора. // Водний транспорт. Збірник наукових праць. – 2023. – Вип. 1(37). – С. 194–200. doi.org/10.33298/2226-8553.2023.1.37.22.

129. Сагін С.В. Визначення розподілу тиску в неньтонівських мастилах у суднових енергетичних установках / С.В. Сагін, М.О. Кривий // Вісник Одеського національного морського університету: Зб. наук. праць. – 2020. – №. 2(62). – С. 160-170. doi.org 10.47049/2226-1893-2020-2-160-170.

130. Сагин С.В. Определение диапазона стратификации вязкости смазочного материала в трибологических системах судовых дизелей / С.В. Сагин // Вісник Одеськ. нац. мор. ун-ту. – 2019. – Вип. 1(58). – С. 89-100.

131. Сагин С.В. Повышение надежности работы прецизионных пар топливной аппаратуры судовых дизелей за счет использования органических покрытий / С.В. Сагин // Вісник Одеськ. нац. мор. ун-ту. – 2018. – Вип. 4(57). – С. 109-120.

132. Сагін С.В. Зниження енергетичних втрат в прецизійних парах паливної апаратури суднових дизелів / С.В. Сагін // Суднові енергетичні установки : наук.-техн. зб. – 2018. – Одеса: НУ «ОМА». – Вип. 38. – С. 139-149.

133. Сагін С.В. Зниження механічних втрат у суднових середньообертових дизелях / С.В. Сагін // Суднові енергетичні установки : наук.-техн. зб. – 2020. – Одеса: НУ «ОМА». – Вип. 40. – С. 5-11. DOI : 10.31653/smf340.2020.5-11.

134. Козицький С.В. Властивості наноструктурованих матеріалів / С.В. Козицький, С.В. Кіріян // Суднові енергетичні установки : науково-технічний збірник. – 2022. – Вип. 45. – Одеса : НУ «ОМА». – С. 123-133. doi : 10.31653/smf45.2022.123-133.

135. Сагін С.В. Зниження механічних втрат у суднових середньообертових дизелях за рахунок оптимізації роботи циркуляційних систем мащення / С.В. Сагін // Вісник Одеського національного морського університету: Зб. наук. праць. – 2020. – № 1(61). – С. 87-96. doi.org 10.47049/2226-1893-2020-1-87-96.

136. Зверьков Д.О. Зниження механічних втрат у суднових дизелях / Д.О. Зверьков, С.В. Сагін // Суднові енергетичні установки: наук.-техн. збірник. – 2020. – Вип. 41. – С. 20-25. DOI: 10.31653/smf341.2020.20-25.

137. Сагін С. В. Розрахунок контактного тиску та зони контакту в парах ковзання судових дизелів / С.В. Сагін, М.О. Кривий // Автоматизація судових технічних засобів : наук.-техн. зб. – 2021. – Вип. 27. – Одеса: НУ«ОМА». – С. 84–92. DOI: 10.31653/1819-3293-2021-1-27-84-92.

138. Sagin S. Analysis of mechanical energy losses in marine diesels / S. Sagin, V. Madey, T. Stoliaryk // Technology Audit and Production Reserves. – 2021. – № 5 (2(61)). – P. 26-32. DOI: <http://doi.org/10.15587/2706-5448.2021.239698>.

139. Богданов М.С. Підвищення енергетичної ефективності морського судна в різних кліматичних умовах експлуатації трансформацією скидної теплоти / М.С. Богданов, В.А. Голіков // Суднові енергетичні установки: науково-технічний збірник. – 2020. – Вип. 41. – Одеса : НУ «ОМА». – С. 167-176.

140. Belousov E. Numerical Assessment of the Rates of Solid Fuel Combustion Reactions and Their Impact on the Working Process of a Solid-Fuel Piston Engine / E. Belousov, A. Marchenko, I. Gritsuk, M. Bulgakov // SAE Technical Paper. – 2021. – 2021-01-5035. DOI: 10.4271/2021-01-5035.

141. Білоусов Є.В. Використання метанолу у якості моторного палива для судових двигунів внутрішнього згоряння / Є.В. Білоусов, А.П. Марченко, В.П. Савчук, Т.П. Білоусова // Двигуни внутрішнього згоряння. – 2024. – № 1. – С. 43–51. DOI: 10.20998/0419-8719.2024.1.06.

142. Kuropyatnyk O.A. Exhaust Gas Recirculation as a Major Technique Designed to Reduce NO_x Emissions from Marine Diesel Engines / O.A. Kuropyatnyk, S.V. Sagin // Nase More : International Journal of Maritime Science & Technology. – 2019. – Vol. 66. – № 1. – P. 1-9. <https://doi.org/10.17818/NM/2019/1.1>.

143. Van T.G. Global impact of recent IMO regulation on marine fuel oil refining processes and ship emissions / T.G. Van, J. Ramirez, Z. Ristovskim, R.J. Brown // Transp. Res. Part D Transp. Environ. – 2019. – № 70. – P. 123-134. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2019.04.001>.

144. Van T.G. Global impact of recent IMO regulation on marine fuel oil refining processes and ship emissions / T.G. Van, J. Ramirez, Z. Ristovskim, R.J. Brown // *Transportation Research Part D: Transport and Environment* – Vol. 70– P. 123-134. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2019.04.001>.

145. Міжнародний кодекс морського перевезення небезпечних вантажів (International Maritime Dangerous Goods (IMDG) Code) (MSC.122(75)) с поправками. Міністерство інфраструктури України: веб-сайт. URL: <https://docs.google.com/viewer?embedded=true&url=https://mtu.gov.ua/files/%D0%86MO%20act%208%2007%2018.docx>.

146. Sandler A. Improving the mathematical model of a fiber-optic inclinometer for vibration diagnostics of elements in the propulsion system with sliding bearings / A. Sandler, V. Budashko, S. Khniunin, V. Bogach // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies: Applied physics*. – 2023. – Vol. 5. – № 5(125). – P. 24–31. DOI: 10.15587/1729-4061.2023.289773.

147. Belousov E. Digital Profiles of Work Processes of a Marine Engine for Calculated Indicator Diagrams in Operating Modes Other than Maximum Continuous Rating / E. Belousov, A. Marchenko, M. Rybalchenko, G. Tuluchenko, et al. // *SAE Technical Paper*. – 2023. – 2023-01-5008. DOI: 10.4271/2023-01-5008.

148. Savchuk V. Intelligent control system of magnetic-impulse parts processing in ship repair production / V. Savchuk, R. Vrublevskyi, I. Gritsuk, M. Bulgakov, M. Ahieiev, I. Bilousov, O. Smyrnov, I. Saraieva // *SAE Technical Paper*. – 2021. – 2021-01-5096. DOI: 10.4271/2021-01-5096.

149. Кузнєцов В. Моніторинг технічного стану суднових малообертових дизелів / В. Кузнєцов // *Вісник Одеського національного морського університету*. – 2020. – № 60. – С. 86-92. <https://doi.org/10.33082/2226-1893-2019-3-86-92>.

150. Fomin O. Substantiation of Improvements for the Bearing Structure of an Open Car to Provide a Higher Security during Rail Sea Transportation /

156. Короткий Т. Р. Сборник резолюций Международной Морской Организации по предотвращению загрязнений морской среды / Т. Р. Короткий, Позолотин Л. А., Торский В. Г. – Одеса : Фенікс, 2012. – 250 с.

157. Matieiko O. Monitoring of the inertization of cargo tanks of LNG class vessels / O. Matieiko // Technology Audit and Production Reserves. – 2024. – № 5(1(79)). – С. 30–37. <https://doi.org/10.15587/2706-5448.2024.314048>.

158. ANSYS FLUENT 12.0 Theory Guide, 2009. URL: <http://orange.engr.ucdavis.edu/Documentation12.0/120/FLUENT/flth.pdf> (дата звернення: 23.08.2024).

159. ANSYS ICEM CFD User Manual, 2012. URL: http://ptechgroup.ir/Virtual_Education/Mechanics/ICEM-CFD/PTEC-ICEM_CFD_14.5_User_Guide.pdf (дата звернення: 23.08.2024).

160. Голиков В.А. Експериментальне визначення показників енергетичної ефективності роботи контейнеровоза класу DNV-GL (13800 TEU) / В.А. Голиков, К.С. Данілов, К.О. Сінюта // Суднові енергетичні установки: науково-технічний збірник. – Вип. 46. – Одеса: НУ «ОМА». – 2023. – С. 41-46. Doi : 10.31653/smf46.2023. 41-46.

161. Sagin S. Ensuring Reliable and Safe Operation of Trunk Diesel Engines of Marine Transport Vessels / S. Sagin, V. Madey, A. Sagin, T. Stoliaryk, O. Fomin, P. Kučera // Journal of Marine Science and Engineering. – 2022. – Vol. 10. – P. 1373. DOI: 10.3390/jmse10101373.

162. Заблоцький Ю.В. Зниження втрат енергії під час забезпечення процесів мащення суднових двигунів внутрішнього згоряння / Ю.В. Заблоцький // Суднові енергетичні установки: науково-технічний збірник. – 2023. – Вип. 47. – Одеса: НУ«ОМА», 2023. – С. 23–31. DOI: 10.31653/smf47.2023.23-31.

163. Guo H. The Influence of Pre-Chamber Parameters on the Performance of a Two-Stroke Marine Dual-Fuel Low-Speed Engine / H. Guo, Z. Wang, S. Zhou, M. Zhang, M. Shreka // Journal of Marine Science and Engineering. – 2024. – Vol. 12. – P. 1232. <https://doi.org/10.3390/jmse12071232>.

164. Kim M.-S. A Comprehensive Review on Material Compatibility and Safety Standards for Liquid Hydrogen Cargo and Fuel Containment Systems in Marine Applications / M.-S. Kim, K.W. Chun // *Journal of Marine Science and Engineering*. – 2023. – Vol. 11. – P. 1927. <https://doi.org/10.3390/jmse11101927>.

165. Maceiras R. Assessment of Selected Alternative Fuels for Spanish Navy Ships According to Multi-Criteria Decision Analysis / R. Maceiras, V. Alfonsin, M.A. Alvarez-Feijoo, L. Llopis // *Journal of Marine Science and Engineering*. – 2024. – Vol. 12. – P. 77. <https://doi.org/10.3390/jmse12010077>.

166. Perčić M. Alternative Fuels for the Marine Sector and Their Applicability for Purse Seiners in a Life-Cycle Framework / M. Perčić, N. Vladimir, M. Koričan, I. Jovanović, T. Haramina // *Applied Sciences*. – 2023. – Vol. 13. – P. 13068. [doi:10.3390/app132413068](https://doi.org/10.3390/app132413068).

167. Мадей В.В. Оптимізація процесу паливоподачі дизелів суден морського транспорту під час використання паливних сумішей до складу яких входить біодизельне паливо / В.В. Мадей, О.М. Волков // *Суднові енергетичні установки : науково-технічний збірник*. – 2022. – Вип. 45. – Одеса : НУ «ОМА». – С. 43-56. [doi: 10.31653/smf45.2022.43-56](https://doi.org/10.31653/smf45.2022.43-56).

168. Sagin S. Ensuring Operational Performance and Environmental Sustainability of Marine Diesel Engines through the Use of Biodiesel Fuel / S. Sagin, O. Kuropyatnyk, O. Matieiko, R. Razinkin, T. Stoliaryk, O. Volkov // *Journal of Marine Science and Engineering*. – 2024. – Vol. 12. – P. 1440. <https://doi.org/10.3390/jmse12081440>.

169. Цюман Є.С. Поліпшення показників екологічності підприємств застосування екологічної стратегії ресурсоефективного та чистого виробництва / Є.С. Цюман, В.І. Зюзюн // *Збірник наукових праць Нац. ун-ту кораблебудування*. – 2021. – № 2. – С. 53-60. [https://doi.org/10.15589/znp2021.2\(485\).8](https://doi.org/10.15589/znp2021.2(485).8).

170. Мельник О.М. Методика організації самооцінки ефективності системи управління безпекою судноплавної компанії / О.М. Мельник, О.А. Онищенко, Д.Г. Парменова // *Водний транспорт. Збірник наукових*

праць. – 2023. – Вип. 1(37). – С. 154-160. doi.org/10.33298/2226-8553.2023.1.37.17.

171. Сагін А.С. Забезпечення енергетичної ефективності суден відповідно новітнім вимогам Додатку VI МАРПОЛ / А.С. Сагін // Матеріали науково-технічної конференції «Морський та річковий флот: експлуатація і ремонт», 24.03.2022 – 25.03.2022.– Одеса: НУ«ОМА». – 2022. – С. 66-68.

172. Koričan M. Alternative Power Options for Improvement of the Environmental Friendliness of Fishing Trawlers / M. Koričan, M. Perčić, N. Vladimir, N. Alujević, A. Fan // Journal of Marine Science and Engineering. – 2022. – Vol. 10. doi:10.3390/jmse10121882.

173. Perčić M. Techno-Economic Assessment of Alternative Marine Fuels for Inland Shipping in Croatia / M. Perčić, N. Vladimir, A. Fan // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2021. – Vol.148. doi:10.1016/j.rser.2021.111363.

174. Kwon J.-W. Assessment of Shipping Emissions on Busan Port of South Korea / J.-W. Kwon, S. Yeo, W.-J. Lee // Journal of Marine Science and Engineering. – 2023. – Vol.11. – P. 716. https://doi.org/10.3390/jmse11040716.

175. Visan N.A. Study on the Cumulative Effects of Using a High-Efficiency Turbocharger and Biodiesel B20 Fuelling on Performance and Emissions of a Large Marine Diesel Engine / N.A. Visan, R. Carlanescu, D.C. Niculescu, R. Chiriac // Journal of Marine Science and Engineering. – 2022. – Vol. 10. – P. 1403. https://doi.org/10.3390/jmse10101403.

176. Ткаченко І.В. Використання в суднових енергетичних установках технології гідродинамічної суперкавітації для розділення і очищення вод, що містять нафту / І.В. Ткаченко // Вісник Одеського національного морського університету : Зб. Наук. праць, 2020. – № 2(62). – С. 130-141. DOI 10.47049/2226-1893-2020-1-130-141.

177. Ткаченко І.В. Розробка технології розділення і очищення вод, що містять нафту / І.В. Ткаченко // Суднові енергетичні установки : наук.-техн. зб. Вип. 40. – Одеса : НУ «ОМА». – 2020. – С. 24-30. DOI : 10.31653/smf340.2020.24-30.

178. Богуславець М. М. Забруднення довкілля: чинники і показники екологічної безпеки нафтопереробного об'єкта / М. М. Богуславець, Л. І. Челядин, Д. Р. Крика // Екологічна безпека та збалансоване ресурсокористування. – 2020. № 19(2). – С. 43-49. [https://doi.org/10.31471/2415-3184-2019-2\(20\)-43-49](https://doi.org/10.31471/2415-3184-2019-2(20)-43-49).

179. Мадей В.В. Управління процесом впорскування під час використання в судових дизелях паливних сумішей, до складу яких входить паливо біологічного походження / В.В. Мадей, С.В. Сагін, О.М. Волков // Водний транспорт : наук.-техн. зб. – 2024. – Вип. 1 (39). – С. 194–206. DOI: 10.33298/2226-8553.2023.2.38.21.

180. Sagin S. Impact of Biofuel on the Environmental and Economic Performance of Marine Diesel Engines / S. Sagin, S. Karianskyi, V. Madey, A. Sagin, T. Stoliaryk, I. Tkachenko // Journal of Marine Science and Engineering. – 2023. – Vol. 11. – P. 120. DOI: 10.3390/jmse11010120.

181. Zhao H. Effects Analysis of FAME on the Engine Characteristics of Different Polymerized Biofuels in Compression Ignition Engine / H. Zhao, Z. Zhang, K. Lu, Y. Ye, S. Gao // Energies. – 2024. – Vol. 17. – P. 2255. <https://doi.org/10.3390/en17102255>.

182. Gospic I. Energetic and Ecological Effects of the Slow Steaming Application and Gasification of Container Ships / I. Gospic, I. Martic, N. Degiuli, A. Farkas // Journal of Marine Science and Engineering. – 2022. – Vol.10. – P. 703.

183. Kim H. A study on the necessity of integrated evaluation of alternative marine fuels / K. Hyungju, K. Kwi, J. Tae-Hwan // Journal of International Maritime Safety, Environmental Affairs, and Shipping. – 2020. – Vol. 4. – P. 1-6. – DOI: <https://doi.org/10.1080/25725084.2020.1779426>.

184. Melnyk O. Implementation Research of Alternative Fuels and Technologies in Maritime Transport / O. Melnyk, S. Onyshchenko, O. Onishchenko, O. Shumylo, A. Voloshyn, V. Ocheretna, O. Fedorenko // Studies

in Systems, Decision and Control. – 2024. – Vol. 510. – P. 13-21. – DOI: 10.1007/978-3-031-44351-0_2.

185. Marchenko A. Research of energy effectiveness and exhaust emissions of direct injection diesel engine running on RME and its blends with DO / A. Marchenko, I. Parsadanov, A. Prokhorenko at al. // Proceedings of the 12th International Conference Transport Means. – 2008. – P. 312-319.

186. Dhyani V. Control of backfire and NO_x emission reduction in a hydrogen fueled mylti-cylinder spark ignition engine using cooled EGR and water injection strategies / V. Dhyani, K.A. Subramanian // International journal of hydrogen energy. – 2019. – Vol. 44.(12) –P. 6287-6298. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.01.129>.

187. Шевченко А.П. Моделювання процесів подавання водно-паливних емульсій у суднових дизельних двигунах / А.П. Шевченко, В.В. Штрибець, О.В. Маннапова, О.І. Рященко // Водний транспорт. – 2024. – №1(39). – С. 137-144. doi : 10.33298/2226-8553.2024.1.39.13.

188. Заблоцький Ю.В. Зниження теплової напруженості суднових дизелів за рахунок використання присадок до палива / Ю.В. Заблоцький // Суднові енергетичні установки: наук.-техн. зб. – Вип. 38. – Одеса: НУ «ОМА». – 2018. – С. 76–87.

189. Сагін А.С. Корегування налаштування паливної апаратури високого тиску під час переведення суднових дизелів на паливо з низьким вмістом сірки / А.С. Сагін // Автоматизація суднових технічних засобів: наук.-техн. зб. – 2023. – Вип. 28. – Одеса: НУ «ОМА». – С. 67 – 78. DOI: 10.31653/1819-3293-2023-1-28-67-78.

190. Сагін А.С. Корегування процесу подачі палива під час використання в суднових дизелях палив з різним вмістом сірки / А.С. Сагін // Суднові енергетичні установки : науково-технічний збірник. – 2023. – Вип. 47. – Одеса: НУ «ОМА». – С. 178-190. doi: 10.31653/smf47.2023.178-190.

191. Сагін А.С. Розробка методу управління процесом паливоподачі під час переведення суднових дизелів на паливо з низьким вмістом сірки /

А.С. Сагін // Збірник матеріалів IV міжнародної науково-практичної конференції: Дніпровські читання-2023, 7 грудня 2023 р. – Київ : Київський інститут водного транспорту імені гетьмана Петра Конашевича-Сагайдачного Державного університету інфраструктури та технологій. – 2023. – С. 82-86.

192. Заблоцький Ю.В. Підвищення паливної економічності суднових дизельних установок / Ю.В. Заблоцький // Вісник Одеського національного морського університету: Зб. наук. Праць. – 2020. – № 2(62). – С. 106–119. DOI: 10.47049/2226-1893-2020-2-106-119.

193. Zablotskyi Yu.V. Applying of fuel additives in marine diesel engines / Yu.V. Zablotskyi, A.S. Sagin // Суднові енергетичні установки : науково-технічний збірник. – 2021. – Вип. 43. – Одеса: НУ «ОМА». – С. 5-17. doi : 10.31653/smf43.2021.5-17.

194. Матейко О.В. Оптимізація процесу інертизації вантажних танків суден-газовозів // Суднові енергетичні установки : науково-технічний збірник. – 2024. – Вип. 48. – Одеса: НУОМА. – С. 75-88. doi: 10.31653/smf48.2024.75-88.

ДОДАТОК

Акти впровадження результатів дисертаційного дослідження



УКРАЇНА

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ОДЕСЬКА МОРСЬКА АКАДЕМІЯ»

вул. Дідріхсона, 8, м. Одеса, 65052, тел.: (+38 048) 793-16-72, факс: (+38 048) 793-16-94
 www.onma.edu.ua e-mail: info@onma.edu.ua Код ЄДРПОУ 01127799

Від _____ № _____

На № _____



АКТ

про використання результатів дисертаційної роботи
 Матейка Олексія Владиславовича
 на тему «Оптимізація процесу інертизації вантажних танків суден-газовозів»
 в освітньому процесі Національного університету «Одеська морська академія»

Ми, що нижче підписались, – начальник навчального відділу Національного університету «Одеська морська академія» Пархоменко М.М., директор навчально-наукового інституту інженерії, к-т техн. наук, професор Колегаєв М.О., завідувач відділу аспірантури та докторантури к-т техн. наук, доцент Волков О.М. – склали цей акт про те, що результати дисертаційної роботи Матейка Олексія Владиславовича на тему «Оптимізація процесу інертизації вантажних танків суден-газовозів» впроваджені в освітній процес під час підготовки здобувачів освіти навчально-наукового інституту інженерії та аспірантури, а саме:

- 1) технологія переспрямування потоків інертного газу, який подається у верхню частину вантажного танка, – під час викладання освітнього компонента «Процеси перетворення енергії суднових силових установок» (для здобувачів наукового ступеня магістр);
- 2) технологія визначення екологічної ефективності процесу інертизації вантажних танків суден газозовів – під час викладання освітнього компонента «Екологічна безпека та альтернативні джерела енергії» (для здобувачів наукового ступеня магістр);
- 3) технологія визначення енергетичної ефективності процесу інертизації вантажних танків суден газозовів – під час викладання освітнього компонента «Енергоресурсозбереження на судах морського та річкового транспорту» (для здобувачів наукового ступеня доктор філософії).

Начальник навчального відділу

Микола ПАРХОМЕНКО

Завідувач відділу аспірантури та докторантури,
к-т техн. наук, доцент

Олександр ВОЛКОВ

Директор навчально-наукового інституту інженерії,
к-т техн. наук, професор

Михайло КОЛЕГАЄВ





SAFESHIP MANAGEMENT INC.

2 Eptanisou Street, 15231 Halandri, Greece

АКТ

щодо використання результатів дисертаційної роботи на здобуття наукового ступеню доктора філософії

Матейка Олексія Владіславовича

«Оптимізація процесу інертизації вантажних танків суден-газовозів»
(спеціальність 271 – морський та внутрішній водний транспорт)

Цей акт складений 20.05.2024 р. у тому, що окремі технологічні розробки, які запропоновані у дисертаційному дослідженні **«Оптимізація процесу інертизації вантажних танків суден-газовозів»** Матейком Олексієм Владіславовичем (а саме технологія визначення енергетичної та екологічної ефективності методів інертизації вантажних танків суден-газовозів) була використана під час проведення комплексу вантажних операцій, що виконувались на судна "Gaz Liberty". При цьому були досягнуто зменшення тривалості процесу інертизації та зменшення енергетичного навантаження на судному електростанцію.

Капітан т/х «Gaz Liberty»



О.І. Суслін

Старший механік т/х «Gaz Liberty»

О.А. Гусельников



INTERUNITY MANAGEMENT CORPORATION S.A.
69 Ethnikis Antistaseos Str., 15231 Athens, Greece

АКТ

щодо використання результатів дисертаційної роботи на здобуття
наукового ступеню доктора філософії

Матейка Олексія Владіславовича

«Оптимізація процесу інертизації вантажних танків суден-газовозів»

Цей акт засвідчує, що запропоновані у дисертаційному дослідженні
«Оптимізація процесу інертизації вантажних танків суден-газовозів»
Матейком Олексієм Владіславовичем:

- технологія визначення стану атмосфери вантажних танків;
- технологія визначення енергетичної та екологічної ефективності методів інертизації вантажних танків суден-газовозів;
- технологія діагностування суцільності розділювального шару, якій попереджує сумішутворення між парами вантажу, що залишилися у вантажному танку та інертним газом, що подається до вантажного танку; були впроваджені на судні-газовозі «Gaz Majestic».

Це забезпечило:

- зменшення тривалості процесу інертизації та призводило зменшення навантаження на суднову електростанцію та скорочувало час експлуатації допоміжного обладнання, яке використовувалось під час інертизації;
- проведення процесу інертизації за найбільш ефективним методом;
- проведення процесу інертизації з найбільшою енергетичною та екологічною ефективністю.

Вказані технології були також використані на інших суднах-газовозах з подібними характеристиками.

Капітан т/х «Gaz Majestic»



С.В. Данченко
21.08.2024

Старший механік т/х «Gaz Majestic»

О.А. Куропятник
21.08.2024



INTERUNITY MANAGEMENT CORPORATION S.A.
69 Ethnikis Antistaseos Str., 15231 Athens, Greece

АКТ

щодо використання результатів дисертаційної роботи на здобуття
наукового ступеню доктора філософії
Матейка Олексія Владіславовича

«Оптимізація процесу інертизації вантажних танків суден-газовозів»

Цей акт засвідчує, що запропоновані у дисертаційному дослідженні
«Оптимізація процесу інертизації вантажних танків суден-газовозів»
Матейком Олексієм Владіславовичем:

- технологія визначення стану атмосфери вантажних танків;
- технологія визначення енергетичної та екологічної ефективності методів інертизації вантажних танків суден-газовозів;
- технологія діагностування суцільності розділювального шару, якій попереджує сумішутворення між парами вантажу, що залишились у вантажному танку та інертним газом, що подається до вантажного танку; були впроваджені на судні-газовозі «Gaz Victory».

Це сприяло підвищенню енергетичної та екологічної ефективності роботи судна.

Капітан т/х «Gaz Victory»



С. Гунченко
19.06.2024



SAFESHIP MANAGEMENT INC.

2 Eptanisou Street, 15231 Halandri, Greece

щодо використання результатів дисертаційної роботи на здобуття наукового ступеню доктора філософії

Матейка Олексія Владіславовича

«Оптимізація процесу інертизації вантажних танків суден-газовозів»
(спеціальність 271 – морський та внутрішній водний транспорт)

Цей акт складений у тому, що технологія переспрямування потоку інертного газу (які потрапляють до вантажного танка під час інертизації), що розроблена та запропонована у дисертаційному дослідженні «Оптимізація процесу інертизації вантажних танків суден-газовозів» Матейком Олексієм Владіславовичем, була використана на морському суді “Gaz Supplier”.

Це забезпечило більш ніж 15 %-е зниження потужності суднового обладнання, що забезпечує проведення процесу інертизації, та сприяло збільшенню екологічної ефективності морського судна.

Капітан
т/х “Gaz Supplier”



Д.В. Данилов
12.07.2024 р.