

УДК 656.614.32:621.564.27

**ТЕХНОЛОГІЯ ТИМЧАСОВОГО ПЕРЕОБЛАДНАННЯ ТА ВИКОРИСТАННЯ
КЛАСИЧНОГО КОНТЕЙНЕРА В РЕФРИЖЕРАТОРНИЙ ШЛЯХОМ
ВСТАНОВЛЕННЯ ТЕРМОВКЛАДИШУ ТА КРІОГАЗИФІКАТОРА ЗІ ЗРІДЖЕНИМИ
КРІОГЕННИМИ РЕЧОВИНАМИ**

Канд. техн. наук О. Г. Слинко, асп. В. А. Столянов

**TECHNOLOGY OF TEMPORARY CONVERSION AND USE OF A CLASSIC
CONTAINER INTO A REFRIGERATED CONTAINER BY INSTALLING A THERMAL
LINER AND A CRYOGASIFIER WITH LIQUEFIED CRYOGENIC SUBSTANCES**

PhD (Tech.) O. H. Slynko, postgraduate student V. A. Stolianov

DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.211.2025.327166>



***Анотація.** У статті наведено пропозицію альтернативи замість уже наявних рефрижераторних контейнерів, напівпричепів та інших інтермодальних транспортних одиниць, яких на світовому ринку часом не вистачає, на короткі та середні відстані класичних інтермодальних транспортних одиниць для перевезення деяких категорій продовольчих вантажів, що потребують температурного охолодження.*

На основі аналізу властивостей рідкого азоту як холодоагенту було подано технологічні операції з тимчасового переобладнання стандартної інтермодальної транспортної одиниці в рефрижераторну шляхом встановлення всередину інтермодальної транспортної одиниці термовкладишу та подальшого монтажу кріогенної установки, що складається з вакуумних трубок і кріогенного газифікатора з автоматичним клапаном регулювання подавання рідкого азоту в систему охолодження на основі показань температурних датчиків, розміщених на стінках інтермодальної транспортної одиниці та всередині самого клапана. Визначено допустимі розміри газифікатора, який займатиме одне вантажне місце. Надано метод розрахунку витрат холодоагенту запропонованою кріогенною установкою в заданих кліматичних умовах. За методом передбачено розрахунок теплового потоку, що поступає всередину інтермодальної транспортної одиниці із зовнішнього середовища, шляхом визначення коефіцієнта теплопередачі, сумарної зовнішньої площі поверхні транспортної одиниці під час руху на палубі морського чи річкового судна (автомобіля-контейнеровоза, залізничної контейнерної платформи) і температурного напору між повітрям всередині транспортної одиниці і зовні. За допомогою спеціального програмного забезпечення розраховано інтервальний час між подаванням холодоагенту і погодинні витрати рідкого азоту для заданого вантажу, що дало змогу визначити добові витрати холодоагенту, кількість подавання його протягом доби та в підсумку отримати час рейсу, за який кріогенний газифікатор повністю використає максимально можливий об'єм холодоагенту без додаткового дозаправлення.

***Ключові слова:** рідкий азот, контейнер, інтермодальна транспортна одиниця, термовкладиш, теплота, кріогенна установка, продовольчі вантажі.*

***Abstract.** This paper presents a proposal to use classical intermodal transport units for short and medium distances instead of existing refrigerated containers, semi-trailers and other intermodal transport units, which are sometimes in short supply on the world market, for the transport of certain categories of foodstuffs requiring temperature cooling.*

Based on the analysis of the properties of liquid nitrogen as a refrigerant, the article presents technological operations for the temporary conversion of a standard intermodal transport unit into a refrigerated one by installing a thermal liner inside the intermodal transport unit and further installing a cryogenic unit consisting of vacuum tubes and a cryogenic gasifier with an automatic valve for regulating the supply of liquid nitrogen to the cooling system based on the readings of temperature sensors placed on the walls of the intermodal transport unit. The permissible dimensions of the gasifier, which will occupy one cargo space, are determined. A method for calculating the refrigerant consumption of the proposed cryogenic unit under specified climatic conditions is presented. The method provides for the calculation of the heat flux entering the intermodal transport unit from the external environment by determining the heat transfer coefficient, the total external surface area of the transport unit while moving on the deck of a sea or river vessel (container ship, railway container platform) and the temperature pressure between the air inside the transport unit and outside.

Subsequently, using special software, the interval time between refrigerant deliveries and the hourly liquid nitrogen consumption for a given cargo were calculated, which made it possible to determine the daily refrigerant consumption, the number of refrigerant deliveries per day and, as a result, to obtain the voyage time during which the cryogenic gasifier would fully use the maximum possible volume of refrigerant without additional refuelling.

Keywords: liquid nitrogen, container, intermodal transport unit, thermal liner, heat, cryogenic unit, food cargo.

Вступ. За даними Міжнародного інституту холоду, щорічно втрачають від 20 до 30 % усіх вироблених у світі продуктів харчування, що складає майже мільярд тонн. Із зазначеної кількості не менше 50 % – це швидкопсувні продукти, збереження яких можливе тільки за допомогою холоду, переважно овочі, плоди і ягоди, а також молочні продукти і кондитерські вироби [1].

Більшість харчових продуктів у процесі збереження може зазнавати небажаних змін. Найчастіше вони викликані мікроорганізмами, під впливом яких відбувається розпад складних хімічних речовин. У результаті з'являються нові, більш прості за складом речовини, що мають неприємний смак і запах. Консервуючи харчові продукти, можна припинити або сповільнити діяльність мікроорганізмів, а також зруйнувати ферментну систему і в такий спосіб запобігти небажаним змінам продуктів [2, 3].

Ураховуючи сучасні тенденції в перевезеннях продовольчих вантажів, використання рефрижераторних контейнерів, що перевозять різними видами транспорту без перевантаження продуктів,

дає змогу істотно підвищити ефективність холодильного ланцюга [4]. За допомогою контейнерів здійснюють внутрішні і міжнародні транспортні операції. У зв'язку з цим їхні масові, габаритні й конструктивні характеристики регламентовано стандартами Міжнародної організації зі стандартів, а також відповідними правилами міжнародних класифікаційних товариств.

Аналіз досліджень та публікацій. Питанням охолодження продовольчих вантажів і правильного процесу їх перевезення займалося багато науковців транспортного і харчового напрямів. У дослідженнях [1, 5-7] описано методи і засоби збереження продовольчих вантажів шляхом їх охолодження, замороження та консервування. У роботі [5] зазначено, що за швидкого заморожування продуктів біохімічні зміни в них протікають менш інтенсивно, уповільнюється розвиток мікроорганізмів, припиняється ферментативна активність, зменшуються втрати вологи продуктом, скорочуються природні втрати і відходи, зберігається якість продукції, збільшується термін її збереження. У роботі [6] основну увагу

приділено способам охолодження продуктів харчування, розглянуто охолодження за допомогою рідкого азоту. Зокрема, автор роботи вказує, що використанням рідкого азоту для перевезення продуктів, що швидко псуються, можна отримати суттєвий економічний ефект.

Наукові досягнення фахівців транспортної галузі подані в дослідженнях [8-10]. У роботі [8] автор досліджує загальні питання та вимоги щодо перевезення продовольчих вантажів (ПВ) автомобільним і залізничним транспортом. Автор стверджує, що тільки комплексне врахування нормативних вимог щодо ПВ, виробничо-технологічних параметрів, фізіологічних і фізико-механічних властивостей продукції, а також відповідний вибір тари та способів транспортування дають змогу забезпечити ефективне перевезення вантажів, що швидко псуються. У дослідженні [9] автори фокусують увагу на вдосконаленні рефрижераторних залізничних поїздів, зокрема визначено технічні вимоги до рухомого складу, використовуваних холодоагентів і надано рекомендації з ремонту і безпечної експлуатації таких поїздів. Що стосується саме інтермодальних транспортних одиниць (ІТО), то їхню якісну класифікацію надано в роботі [10].

Для нашого дослідження найбільш цікавим є класифікація ІТО за призначенням: ізотермічні контейнери (термоізовані, рефрижераторні з машинним охолодженням, рефрижераторні з холодоагентом, що самовідновлюється) і опалювані. На окрему увагу заслуговує робота [4], де детально описані конструкція, переваги і недоліки рефрижераторних контейнерів, використовуваних на морському транспорті, їхніх холодильних установок, а також наведено розрахунки теплових втрат таких контейнерів.

Мета і завдання дослідження. 90 % усіх контейнерів має машинне охолодження, оскільки воно надійне, універсальне і автономне [4]. Живлення

холодильної машини забезпечено від дизель-генератора або зовнішньої мережі 220/380 В, управління холодильною машиною повністю автоматизовано, включаючи перемикання режимів роботи (охолодження — опалювання). На рис. 1 зображено конструкцію класичного рефрижераторного контейнера з машинним охолодженням зі способом розміщення холодильного обладнання, циркуляції повітря та його поперечного розрізу [11].

При цьому використання рефрижераторних контейнерів є досить дорогим. Відомо, що кількість рефрижераторних контейнерів на ринку досить обмежена, а постійне забезпечення охолоджуваної машини енергією потребує від транспортного засобу чи складу додаткових витрат. Особливо це позначається для перевезень на короткі відстані. Також мало вивченим залишається використання кріотехнологій для перевезення. Науковці лише загально вказують на переваги та недоліки використання рідкого азоту чи іншого холодоагенту для доставлення швидкопсувних вантажів, у тому числі за допомогою рефрижераторних ІТО з холодоагентом [11]. На рис. 2 зображено типову рефрижераторну ІТО з рідким (азотним) охолодженням, а саме принципову схему і розташування азотної системи охолодження в контейнері.

Тому в цьому дослідженні пропонується використовувати класичні ІТО з їхнім додатковим тимчасовим переобладнанням (без встановлення фальш-стілки чи окремого відсіку для кріоемності) у рефрижераторні контейнери з системою охолодження за допомогою рідкого холодоагенту (рідкий азот, вуглекислота). Як холодоагент у дослідженні розглянуто рідкий азот. При цьому використання інших рідких холодоагентів (вуглекислота тощо) також допускається. Для досягнення мети сформульовано основні завдання:

- дати визначення характеристик вибраного холодоагенту щодо властивостей ПВ;

• розробити в першому наближенні технологічні операції з переобладнання класичного ІТО у рефрижераторний із його охолодженням рідким азотом, а також завантаження переобладнаного контейнера ПВ;

• опрацювати спосіб розрахунку витрат азоту і часу рейсової роботи запропонованого ІТО залежно від температури перевезення і тимчасового (у нештатних ситуаціях) зберігання вантажу і температури навколишнього середовища.

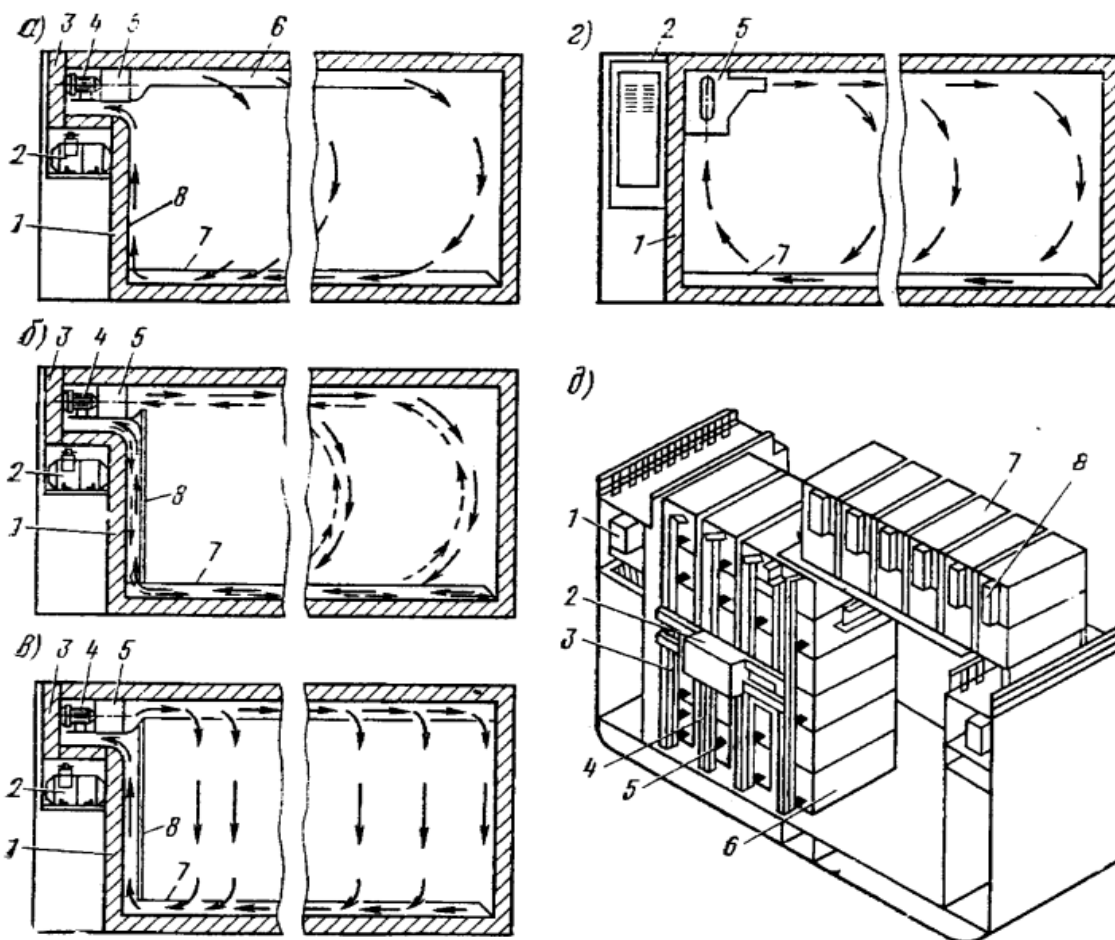


Рис. 1. Схема розміщення холодильного обладнання, циркуляції повітря та поперечного розрізу класичного рефрижераторного контейнера:

а – з подаванням повітря в контейнер через підвісні повітропроводи; б – те саме через щілину в торцевій стінці; в – те саме через підвісну стелю; г – з розташуванням повітроохолоджувача у вантажному відсіку: 1 – теплоізоляція; 2 – холодильна машина; 3 – знімна кришка; 4 – вентилятор; 5 – повітроохолоджувач; 6 – повітророзподільні канали; 7 – алюмінієва підлога; 8 – фальш-стінка; д – схема поперечного розрізу судна-контейнеровоза: 1 – суднова холодильна машина; 2 – повітроохолоджувач; 3, 4 – повітропроводи; 5 – з'єднувальна муфта; 6 – трюмний контейнер; 7 – палубний контейнер; 8 – автономна холодильна машина контейнера [11]

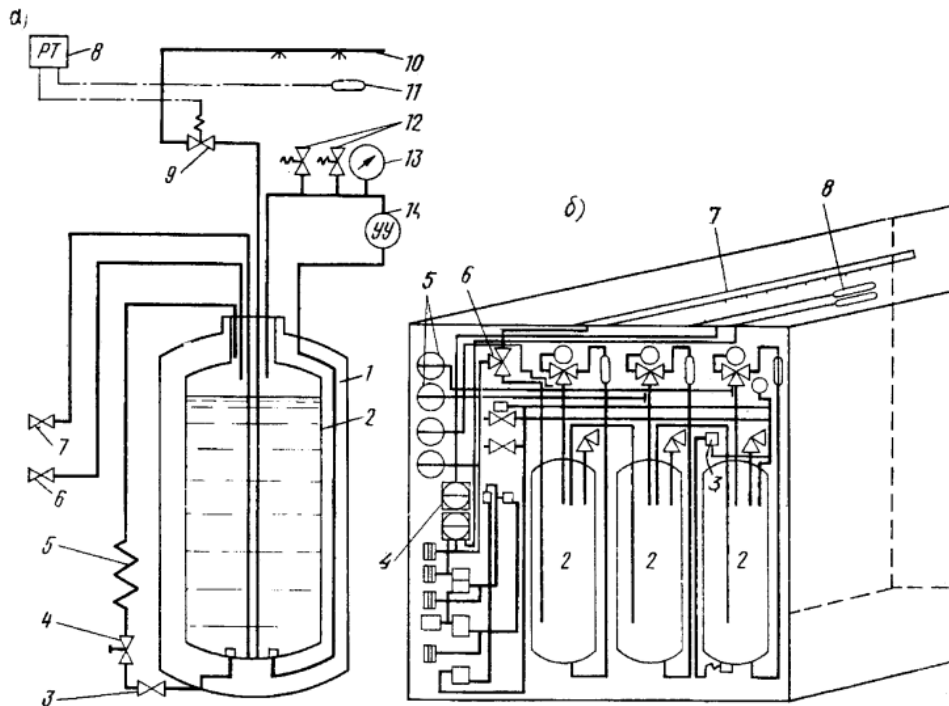


Рис. 2. Принципова схема і розташування азотної системи охолодження в контейнері:
 а – принципова схема: 1 – кожух резервуара; 2 – резервуар із холодоагентом; 3 – запірний вентиль; 4 – регулятор тиску; 5 – випаровувач; 6 – вентиль газоскиду; 7 – вентиль газонаповнення; 8 – термореле; 9 – соленоїдний вентиль; 10 – розпилювальний колектор; 11 – датчик термореле; 12 – запобіжні клапани; б – схема розташування азотної системи в контейнері: 1 – вантажний відсік; 2 – резервуари з азотом; 3 – регулятор тиску; 4 – регулятор температури; 5 – вимірювальні прилади; 6 – регулюючий вентиль; 7 – розпилювач; 8 – температурний датчик [11]

Основна частина дослідження.

Рідкий азот – рідина прозорого кольору. Є одним із чотирьох агрегатних станів азоту. Рідкий азот має питому густину 808 кг/м^3 і має точку кипіння $77,4 \text{ К}$. У вільному вигляді – газ без кольору, запаху і смаку, погано розчинний у воді. Складається з двоатомних молекул N_2 , що мають високу міцність [12]. Рідкий азот отримують у промисловому масштабі кріогенною перегонкою зрідженого повітря або скрапленням чистого азоту, отриманого з повітря з використанням адсорбції за змінного тиску. Повітряний компресор використано для стиснення відфільтрованого повітря високого тиску;

газ під високим тиском охолоджують до кімнатної температури, що дає змогу розширити його до низького тиску. Розширене повітря сильно охолоджується, унаслідок чого кисень, азот, аргон розділяються на наступних етапах розширення та дистиляції. Установка, на якій це відбувається, називається детандером. Дрібне виробництво рідкого азоту легко реалізувати за допомогою цього принципу [12]. Літр рідкого азоту, випаровуючись і нагріваючись до $20 \text{ }^\circ\text{C}$, утворює приблизно 700 л газу. З цієї причини рідкий азот зберігають у спеціальних посудинах Дьюара з вакуумною ізоляцією відкритого типу,

кріоциліндрах або кріогенних ємностях під тиском [12].

Рідкий азот використовують у різних галузях промисловості (кріогенне різання, металургія, виробництво аміаку), медицині та навіть пожежогасінні. Що стосується ПВ, то головними перевагами в застосуванні азоту вчені зазначають [13] його безпечність, відсутність смаку і запаху, хімічну інертність. Азот не змінює консистенцію чи колір продукту. У харчовій промисловості азот зареєстрований як харчова добавка Е-941 і є газовим середовищем для пакування і зберігання продукції, холодоагентом. Рідкий азот використовують для фасування рідин, створення надлишкового тиску й інертного середовища в пакуванні. Це спричинило переверот у пакувальній індустрії за останні роки і зростання попиту на генератори азоту [13].

До переваг рідкого азоту також відносять швидкість самого процесу охолодження, замороження вантажу, простоту технології та устаткування, а також можливість автоматизації всієї системи. Крім того, низькотемпературне зберігання в азотному середовищі ПВ запобігає небажаним змінам сировини під дією власних ферментів, мікроорганізмів і окиснювальних реакцій через контакт із киснем повітря [14]. Крім того, слід урахувати, що кріогенні установки мають невеликі габарити і високий ступінь використання об'єму. Для них характерна універсальність режиму роботи [14].

Основним недоліком використання рідкого азоту як холодоагенту, що знижує ефективність його застосування, є його висока вартість і великі витрати. Однак зараз у світі спостерігають тенденцію до здешевлення вартості рідкого азоту за рахунок того, що в газовій промисловості за виробництва кисню рідкий азот фігурує як побічний продукт. Його виробництво можна налагодити шляхом невеликих капіталовкладень [14].

Технологічні операції з переобладнання класичного ІТО у рефрижераторний. Визначивши основні характеристики рідкого азоту як холодоагенту, розроблено технологічні операції, що дають змогу перевозити рефрижераторні вантажі у звичайних класичних, але переобладнаних ІТО. Загалом запропоновані технологічні операції базовані на ідеях патентів [15-17], однак ця стаття має і суттєві відмінності від раніше зареєстрованих винаходів.

Початковою технологічною операцією є процес власне обладнання звичайного ІТО у рефрижераторний. Для переобладнання всередині контейнера встановлюють спеціальний термовкладиш, який має захистити вантаж від впливу зовнішніх чинників. У статті запропоновано використовувати термовкладиш на базі технології «THERMAL CONTAINER LINER» [18].

Термальний вкладиш вироблено з матеріалу, що являє собою металізовану PET-плівку зі світловідбивною здатністю, спініним PE з теплозахисною функцією, затемненим PE для уникнення просвічування ультрафіолетових променів. Критичною точкою інноваційної технології є також повна герметизація швів, що унеможливорює просвічування і потрапляння повітря, запобігаючи утворенню конденсату всередині вкладки. Теплові властивості вкладиша допомагають запобігти сильним перепадам температури, зберігати різницю зовнішнього середовища і середовища всередині термовкладиша в температурному інтервалі +15...+16 °C [18, 19]. Встановлення термовкладишу відбувається через двері. Сам процес повного розгортання становить від 10 до 15 хв.

Наступною технологічною операцією є завантаження вантажу в термовкладиш і розгортання системи розпилювання. Для розпилювання рідкого азоту всередині ізотермічного контейнера на даху встановлюють спеціальні гнучкі трубки з прорізами діаметром від 15 до 35 мм. Розміщення трубок, їх закріплення і

з'єднання в єдину систему відбувається за каналним принципом одночасно з завантаженням, урахувуючи схему розташування вантажних місць у контейнері. Канальний принцип полягає в розміщенні центрального трубопроводу по осі контейнера між вантажними місцями по довжині, який у свою чергу розділений на два невеличкі трубопроводи, встановлювані також між вантажними місцями по ширині. На рис. 3 схематично зображено розміщення трубок у контейнері.

Заключною технологічною операцією є встановлення кріюємностей із рідким азотом і підключення системи охолодження. Ємності з рідким азотом завантажують виключно на останнє вантажне місце біля дверей ІТО (на рис. 3 виділено сірим

кольором). Таке розташування є найкращим щодо безпеки та зручності. У випадку аварійної, небезпечної ситуації кріюємності можна оперативно вимкнути, перекривши ручний клапан подавання рідкого азоту і за необхідності оперативно від'єднати установку та винести її з контейнера. Самі ємності заздалегідь встановлено на спеціальну конструкцію, яка дає змогу закріпити їх усередині ІТО як і піддон вантажу, а також транспортувати на складському майданчику за допомогою навантажувача. Як тільки кріюємності встановлено, відбувається процес приєднання трубки центрального трубопроводу до зарядного клапана ємностей із рідким азотом (позначено цифрою 3 на рис. 1).

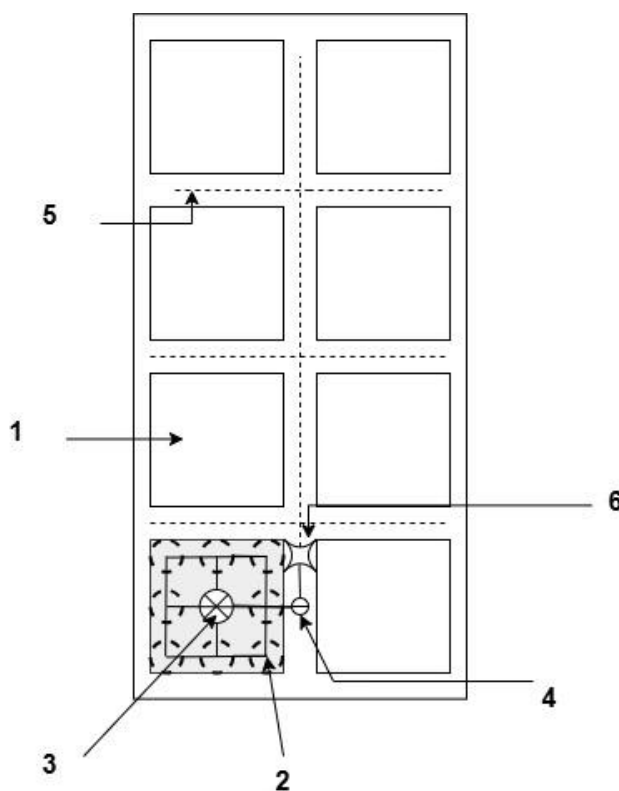


Рис. 3. Схематичне зображення розташування трубок охолодження на прикладі 20-футового контейнера:

- 1 – вантажне місце; 2 – кріюємність; 3 – ручний клапан кріюємності, він же зарядний;
- 4 – автоматичний клапан подавання азоту в систему охолодження;
- 5 – трубки розприскування рідкого азоту; 6 – сопло Лавалю

Далі відбувається приєднання трубопроводів, після чого працівники відкривають ручний клапан подавання, закривають термовкладиш і зачиняють двері контейнера. Після повного закриття дверей ІТО дистанційно вмикається автоматичний клапан подавання рідкого азоту в систему розпилення (позначено 4 на рис. 3). Автоматичний клапан оснащений термореле і маленьким комп'ютером, який регулює кількість азоту, що необхідно розпилити для досягнення необхідної температури.

Процес подавання рідкого азоту зображено на рис. 4. У балонах 1 знаходиться скраплений насичений азот під тиском 1,89 бар, його температура дорівнює мінус 190,09 °С, густина 808 кг/м³. Клапан 2 використовують для заправлення балонів скрапленим азотом, а також консервації установки. Подавання азоту здійснюється автоматичним імпульсно-соленоїдним

клапаном 4, керованим даними з термореле. Азот подають у звужувальну частину сопла Лавалю 6, швидкість його збільшується, а тиск зменшується. Проектуємо і виготовляємо таке сопло, щоб тиск у мінімальному перерізі сопла став менше за атмосферний (1 бар). Підводимо до цього перерізу повітропровід через триходовий клапан 5 із шиббером, що регулює витрати зовнішнього і внутрішнього контейнерного повітря, яке всмоктує сопло. Свіже повітря необхідне для перевезення «дихаючих» вантажів. Частину сопла, що розширюється, проектуємо і виготовляємо, задавшись температурою і тиском суміші азоту і повітря. Зрозуміло, що тиск суміші має бути дещо вище за атмосферний, а температура вище за температуру суміші, що подають у вантаж, оскільки з дроселюванням через отвори розподільної труби 7 її температура знижується.

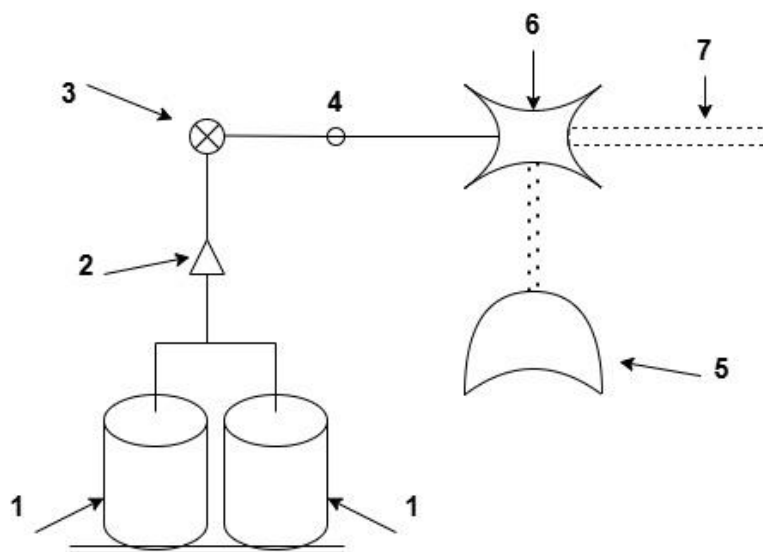


Рис. 4. Процес подавання рідкого азоту в систему охолодження ІТО:

- 1 – балони з рідким азотом; 2 – витратний (зарядний) клапан; 3 – запобіжний клапан;
4 – соленоїдний клапан із термореле; 5 – триходовий клапан; 6 – сопло Лавалю;
7 – розподільна труба

Як тільки температура навколо починає знижуватись і наближається до заданих параметрів, подавання

припиняється, аби дати парі охолодити внутрішній простір і економно витратити холодоагент. Оскільки температура рідкого

азоту в балонах низька ($-190,09^{\circ}\text{C}$), теплоприпливи в балони неминучі, відповідно відбувається процес перетворення рідини в пару, як і підвищення тиску. Тому балони мають бути обладнані захисними клапанами 3. З підвищенням тиску пари вище установленого на клапані, він відкривається і пара скидається в сопло Лавалю та поступає у вантаж, додатково передчасно охолоджуючи його.

Як тільки вантаж доставлено до пункту призначення, процес вивантаження і розбирання обладнання відбувається у зворотному порядку, а саме спочатку перекривають ручний клапан подавання азоту, далі кріюємності від'єднують від трубок, вивантажують із контейнера на дозаправлення і обслуговування, послідовно виймають вантаж із розбиранням системи трубопроводів. Як тільки процес вивантаження завершено, відбувається демонтаж термовкладиша, і контейнер готовий приймати наступний вантаж.

Визначення кількості азоту, необхідної для перевезення. Для розрахунку кількості рідкого азоту будемо виходити з того, що кріобалони мають певні розміри, аби поміститись у контейнер. Кріюємності виготовляють у вигляді циліндрів [20], тому і в нашому випадку також будемо використовувати циліндричну форму. Внутрішні розміри контейнера накладають обмеження за висотою циліндра. Також розміри установки не можуть бути більше за розмір палети, на якій буде встановлено балони. Отже, з урахуванням розміру різних типів палет [21-23] і задля зручності експлуатації і стандартизації виробництва пропонуємо використовувати стандартні циліндричні кріобалони діаметром 400 мм, крани подавання яких з'єднано між собою в єдину систему. На європейській і фінській палетах може бути вільно розміщено шість балонів, а на американській – дев'ять.

Перейдемо до розрахунку висоти та об'єму циліндричної кріюємності. Висота кріюциліндра

$$h = h_{\text{cont}} - h_{\text{tv}} - h_{\text{pal}} - h_{\text{d}}, \quad (1)$$

де h_{cont} – висота контейнера за внутрішніми розмірами [22];

h_{tv} – висота термовкладиша. У нашому дослідженні дорівнює 4 см;

h_{pal} – висота палети, за міжнародними стандартами, дорівнює 145 мм [23];

h_{d} – висота додаткового зазора, необхідного для встановлення клапанів і фіксуючих елементів, приймають 7 см.

Виконаємо необхідні розрахунки для європейської, фінської та американської палет. Приклад розрахунку покажемо на американській палеті для 20-футового контейнера:

$$h = 2,39 - 0,04 - 0,145 - 0,07 = 2,13 \text{ м},$$

$$V_1 = 3,14 * 0,2^2 * 2,13 = 0,267 \text{ м}^3,$$

$$V = 0,267 * 9 = 2,408 \text{ м}^3.$$

Оскільки ціна закупівлі рідкого азоту виставлена в одиницях маси (кг, т) [24], необхідно перевести об'ємну величину в масу:

$$m = \rho * V, \quad (2)$$

де ρ – питома густина рідкого азоту, що дорівнює 808 кг/м^3 [12].

$$m = 808 * 2,408 = 1945,46 \text{ кг}.$$

Отже, для охолодження 20-футового контейнера циліндричної форми, яку встановлено на американську палету, знадобиться до 1945,46 кг рідкого азоту. Аналогічні розрахунки проведемо для інших типів палет і контейнерів (табл. 1).

Таблиця 1

Результати розрахунку максимально допустимого об'єму та маси рідкого азоту у кріоємностях циліндричної форми для різних типів контейнерів

20-футовий	n, од	d, м	h_{cont} , м	h_{pal} , м	h_{tv} , м	h_d , м	h, м	V, м ³	m, кг
Євро і фінська	6	0,4	2,39	0,145	0,04	0,07	2,13	1,605	1296,98
Американська	9	0,4	2,39	0,145	0,04	0,07	2,13	2,408	1945,46
40-футовий									
Євро і фінська	6	0,4	2,39	0,145	0,04	0,07	2,13	1,605	1296,98
Американська	9	0,4	2,39	0,145	0,04	0,07	2,13	2,408	1945,46
40-футовий hc									
Євро	6	0,4	2,65	0,145	0,04	0,07	2,39	1,801	1455,29
Американська	9	0,4	2,65	0,145	0,04	0,07	2,39	2,702	2182,94

Розрахунок витрат рідкого азоту під час роботи кріогенної установки. Для визначення витрат холодоагенту в контейнері необхідне розуміння, яка кількість теплоти проникає всередину ІТО під час перевезення. Для цього розрахуємо деякі теплофізичні властивості. Для визначення витрат азоту під час перевезення і зберігання вантажу необхідно розрахувати теплоприпливи в контейнер, які залежать, по-перше, від температури зовнішнього повітря, по-друге, теплової ізоляції контейнера. Розрахунки виконано для декількох температур зовнішнього повітря

від +50 до +10 °С, що відповідає повному діапазону можливих умов перевезення і зберігання вантажів у контейнері: від тропічного клімату до помірного.

Для розрахунку теплоприпливів у контейнер розраховано коефіцієнт теплопередачі через огорожувальні поверхні контейнера. Прийнято, що контейнер перевозять на палубі судна, причепі контейнеровоза або залізничній платформі за температур навколишнього повітря $t_{outs.} = 50, 40, 30, 20, 10$ °С. На рис. 5 схематично зображено прийняту ізоляцію огорожувальних поверхонь контейнера.

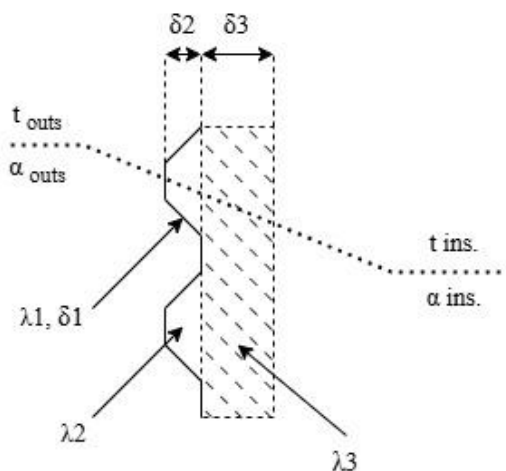


Рис. 5. Схематичне зображення проникнення теплового потоку

Теплоприпливи в контейнер визначали за формулою

$$Q = k \cdot F \cdot \Delta t, \quad (3)$$

де k – коефіцієнт теплопередачі огорожувальних поверхонь контейнера;

F – сумарна внутрішня площа огорожувальних поверхонь контейнера;

Δt – температурний напір (різниця температур зовнішнього повітря і повітря всередині контейнера з вантажем).

Коефіцієнт теплопередачі

$$k = \frac{1}{R_{\alpha_{outs}} + R_{\lambda_1} + R_{\lambda_2} + R_{\lambda_3} + R_{\alpha_{ins}}}, \quad (4)$$

де $R_{\alpha_{outs}}$ – термічний опір зовнішнього середовища;

R_{λ_1} – термічний опір теплопровідності сталевго корпусу контейнера;

R_{λ_2} – термічний опір повітряного зазора між корпусом і термовкладишем;

R_{λ_3} – термічний опір термовкладиша;

$R_{\alpha_{ins}}$ – термічний опір тепловіддачі від поверхні термовкладиша до повітря вантажу (зазвичай коефіцієнт тепловіддачі в нерухомому повітрі приміщення не перевищує значення $\alpha_{ins} = 10 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$, $t_{ins} = -20 \text{ }^\circ\text{C}$).

Нижче наведемо приклад розрахунку коефіцієнта теплопередачі для переобладнаного 20-футового контейнера з вантажем замороженого м'яса яловичини. Контейнер розташовано на борту судна-

контейнеровоза, що рухається зі швидкістю 20 вузлів.

Розрахуємо складові коефіцієнта теплопередачі:

1) термічний опір за тепловіддачі від повітря до зовнішньої поверхні контейнера

$$R_{\alpha_{outs}} = \frac{1}{\alpha_{outs}}. \quad (5)$$

Для цього розраховано коефіцієнт тепловіддачі від зовнішнього повітря до стінок контейнера

$$\alpha_{air,outs} = \alpha_{outs} = \frac{Nu \cdot \lambda_{outs}}{l}, \quad (6)$$

де λ_{outs} – коефіцієнт теплопровідності повітря за температури навколишнього середовища [25],

$\lambda_{outs} = 2,77 \cdot 10^{-2} \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$;

Nu – критерій Нуссельта;

l – зовнішня довжина контейнера.

Для знаходження критерію Нуссельта визначено характер руху повітря відносно поверхні контейнера, для цього розраховано критерій Рейнольдса Re_1 :

$$Re_1 = \frac{w \cdot l}{\nu}, \quad (7)$$

де w – швидкість повітря відносно поверхні контейнера;

ν – коефіцієнт кінематичної в'язкості повітря за температури $50 \text{ }^\circ\text{C}$ [25],

$\nu = 1,76 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2/\text{с}$.

$$Re_1 = \frac{10,29 \cdot 6,06}{1,76 \cdot 10^{-5}} = 35,430 \cdot 10^5 > 5 \cdot 10^5.$$

Оскільки критерій Рейнольдса більше $5 \cdot 10^5$ – течія повітря турбулентна, і число Нуссельта розраховують за формулою

$$Nu = 0,032 \cdot Re_1^{0,8}. \quad (8)$$

$$N_u = 0,032 * (35,430 * 10^5)^{0,8} = 5554,57.$$

Коефіцієнт тепловіддачі від повітря до зовнішньої поверхні контейнера

$$\alpha_{outs} = \frac{5554,57 \cdot 2,77 \cdot 10^{-2}}{6,06} = 25,39 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}.$$

$$R_{\alpha_{outs.}} = \frac{1}{25,39} = 0,039 \frac{\text{м}^2 \cdot \text{К}}{\text{Вт}}.$$

2) термічний опір теплопровідності сталевого корпусу контейнера

$$R_{\lambda_1} = \frac{\delta_1}{\lambda_1}, \quad (9)$$

де δ_1 – товщина стінок контейнера, $\delta_1 = 2 \text{ мм}$ [22];

λ_1 – коефіцієнт теплопровідності сталі [25], $\lambda_1 = 45 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}$;

$$R_{\lambda_1} = \frac{0,002}{45} = 44,4 \cdot 10^{-6} \frac{\text{м}^2 \cdot \text{К}}{\text{Вт}};$$

3) термічний опір повітряного зазора між корпусом і термовкладишем

$$R_{\lambda_2} = \frac{\delta_2}{\lambda_2}, \quad (10)$$

де δ_2 – товщина зазора між поверхнею контейнера і термовкладишем (приймаємо $\delta_2 = 5 \text{ мм}$);

λ_2 – коефіцієнт теплопровідності повітря $\lambda_2 = 0,024 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}$ [25];

$$R_{\lambda_2} = \frac{0,005}{0,024} = 0,208 \frac{\text{м}^2 \cdot \text{К}}{\text{Вт}};$$

4) термічний опір термовкладиша

$$R_{\lambda_3} = \frac{\delta_3}{\lambda_3}, \quad (11)$$

де δ_3 – товщина термовкладиша (приймаємо $\delta_3 = 35 \text{ мм}$);

λ_3 – коефіцієнт теплопровідності термовкладиша, $\lambda_3 = 0,035 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}$ [26].

$$R_{\lambda_3} = \frac{0,035}{0,035} = 1 \frac{\text{м}^2 \cdot \text{К}}{\text{Вт}};$$

5) термічний опір тепловіддачі від поверхні термовкладиша до повітря вантажу

$$R_{\alpha_{ins}} = \frac{1}{\alpha_{ins}}, \quad (12)$$

$$R_{\alpha_{ins}} = \frac{1}{10} = 0,1 \frac{\text{м}^2 \cdot \text{К}}{\text{Вт}}.$$

Тоді коефіцієнт теплопередачі через огорожувальні поверхні пропонованого контейнера

$$k = \frac{1}{0,039 + 44,4 \cdot 10^{-6} + 0,208 + 1 + 0,1} = 0,742 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}.$$

Температурний напір між зовнішнім повітрям t_{outs} і повітрям всередині контейнера t_{ins}

$$\Delta t = t_{outs} - t_{ins}, \quad (13)$$

$$\Delta t = 50 - (-20) = 70 \text{ }^{\circ}\text{C}.$$

Внутрішні розміри 20-футового контейнера дорівнюють (LxBxH) = (5,75x2,35x2,39 м).

Загальна внутрішня поверхня такого контейнера дорівнює $F = 65,74 \text{ м}^2$, а внутрішній об'єм – $V_{\text{ins}} = 32,29 \text{ м}^3$. Питомий тепловий потік від зовнішнього повітря всередину такого контейнера дорівнює

$$Q = 0,742 \cdot 65,743 \cdot 70 = 3,415 \text{ кВт} = 3,415 \frac{\text{кДж}}{\text{с}}.$$

Визначаємо термодинамічні властивості холодоагенту. Рідкий азот подають за допомогою ежектора, головним елементом якого є сопло Лавалю. Основним призначенням ежектора, побудованого за особливістю сопла Лавалю, є всмоктування рідини з однієї ємності і подавання її в другу. У нашому випадку повітря всмоктується і подається в одну і ту саму ємність – у контейнер, якщо в контейнері перевозять вантаж, що не потребує свіжого повітря. Якщо ж у контейнері перевозять вантаж, що «дихає», то в контейнер необхідно подавати свіже повітря в спеціально розрахованій кількості, потрібної для вантажу.

Атмосферний тиск повітря в контейнері дорівнює 0,101325 МПа. Відношення тиску рідини в мінімальному перерізі сопла Лавалю до тиску заторможеного потоку (перед соплом) називають критичним і для азоту, як двоатомного газу, дорівнює $\beta = 0,528$ [27].

Прийнявши в мінімальному перерізі сопла Лавалю $\beta = 0,528$ і тиск 0,1 МПа, розраховуємо тиск заторможеного потоку азоту (тиск рідкого азоту в балоні):

$$P_{\text{bal.}} = \frac{1}{\beta}, \quad (14)$$

$$P_{\text{bal.}} = \frac{1}{0,528} = 1,89 \text{ бар.}$$

Оскільки азот у балоні знаходиться в стані насиченої рідини, то за допомогою програмного забезпечення «Refprop» обчислюємо його термодинамічні властивості: температура $-190,09 \text{ }^{\circ}\text{C}$; густина – 808 кг/м^3 ; ентальпія – $h_1 = -110,22 \text{ кДж/кг}$; ентропія – $2,900 \text{ кДж/(кг}\cdot\text{K)}$. У звужувальній частині сопла Лавалю азот ізоентропно розширюється, тому його термодинамічні властивості в мінімальному перерізі сопла дорівнюють: температура $-195,91 \text{ }^{\circ}\text{C}$; ентальпія $-110,76 \text{ кДж/кг}$ (визначені за тиску 1 бар і ентропії $2,9800 \text{ кДж/(кг}\cdot\text{K)}$). На виході із сопла суміш азоту і повітря, всмоктана соплом, повинна мати тиск дещо вище за атмосферний, щоб, здолавши гідравлічний опір розпорошувального колектора, вийти в простір контейнера. Температура суміші має бути дещо вище, ніж її температура на вході в простір контейнера, оскільки з дроселюванням через маленькі отвори розпорошувального колектора її температура знизиться. Тому прийнято тиск 1,03 бар, а температуру $-25 \text{ }^{\circ}\text{C}$, тоді ентальпія азоту в цьому стані дорівнює $h_2 = 257,19 \text{ кДж/кг}$. Отже, теплота, поглинена 1 кг азоту з його проходженням через сопло Лавалю,

$$\Delta q_{\text{N}_2} = h_2 - h_1, \quad (15)$$

$$\Delta q_{\text{N}_2} = 257,19 - (-110,76) = 367,75 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}.$$

Навантажувальна щільність замороженого м'яса ($t_{ins} = -20\text{ }^{\circ}\text{C}$) становить $0,37...0,43\text{ т/м}^3$ [28]. Приймаємо $m_{cargo} = 0,4\text{ т/м}^3$.

Теплоємність вантажу при цьому становить [28]

$$C_{p, cargo} = 3,4\text{ кДж/(кг}\cdot\text{K)}.$$

Визначимо об'єм і масу вантажу в контейнері.

Об'єм, зайнятий балоном із рідким азотом

$$V_{bal.} = a * b * h, \quad (16)$$

де a – довжина палети;

b – ширина палети.

$$V_{bal.} = 1,2 * 1,2 * 2,13 = 3,07\text{ м}^3.$$

Об'єм, що займає вантаж, який перевозять,

$$V_{cargo} = V_{ins} - V_{bal.} \quad (17)$$

$$V_{cargo} = 32,29 - 3,07 = 29,23\text{ м}^3.$$

Тепер розрахуємо масу вантажу, яку будуть перевозити:

$$M_{cargo} = V_{cargo} * m_{cargo}, \quad (18)$$

$$M_{cargo} = 29,23 * 0,4 = 11,69\text{ т}.$$

Теплота, що поглинає вантаж під час його отеплення, на Δt_{ins} , $^{\circ}\text{C}$ (приймаємо рівним $\Delta t_{ins} = 1\text{ }^{\circ}\text{C}$),

$$\Delta Q_{cargo} = C_{p, cargo} * M_{cargo} * \Delta t_{ins}, \quad (19)$$

$$\Delta Q_{cargo} = 3,4 * 11,69 * 1 = 39,749\text{ МДж}.$$

Час для отеплення вантажу на Δt_{ins} , $^{\circ}\text{C}$,

$$\tau = \frac{\Delta Q_{cargo}}{Q}, \quad (20)$$

$$\tau = \frac{\left(\frac{39,749 * 10^3}{3,415}\right)}{3600} = 3,23\text{ год}.$$

Витрати рідкого азоту криогенною установкою протягом циклу τ для забезпечення температури в допустимих межах

$$G_{N_2} = \frac{Q}{\Delta q_{N_2}}, \quad (21)$$

$$G_{N_2} = \frac{3,415}{367,75} = 0,0093\text{ } \frac{\text{кг}}{\text{с}} * 3600 = 33,43\text{ } \frac{\text{кг}}{\text{год}}.$$

Отже, витрати запропонованої установки, яка стоїть на опорі, що за розмірами відповідає американській палеті всередині 20-футового контейнера, який знаходиться на палубі судна контейнеровоза з вантажем замороженої яловичини за температури зберігання $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ і температурі зовнішнього повітря $+50\text{ }^{\circ}\text{C}$, становить

$33,43\text{ кг/год}$ з інтервалом подавання речовини кожні $3,23\text{ год}$ або $3\text{ год } 14\text{ хв}$. При цьому коливання температури повітря всередині становить $1\text{ }^{\circ}\text{C}$. Для того щоб зрозуміти, якими будуть добові витрати, визначимо кількість циклів подавання і добові витрати холодоагенту.

Кількість циклів подавання протягом доби

$$n = \frac{24}{\tau}, \quad (22)$$

$$n = \frac{24}{3,23} = 7,42 \text{ цикл.}$$

Добове подавання холодоагенту

$$G = G_{N_2} * n, \quad (23)$$

$$G = 33,43 * 7,42 = 248,08 \frac{\text{кг}}{\text{доба}}.$$

Максимальний час рейсу, за який буде витрачено весь запас холодоагенту,

$$T_{\text{voy}} = \frac{m}{G}, \quad (24)$$

де m – максимальна маса рідкого азоту, що зберігається в кріоємності;

G – добове подавання холодоагенту.

$$T_{\text{voy}} = \frac{1945,46}{248,08} = 7,84 \text{ діб} = 7 \text{ діб } 20 \text{ год.}$$

Аналогічно проведемо розрахунок для інших типів основ кріоємності і типів ІТО (табл. 2).

Таблиця 2

Результати розрахунку добових витрат рідкого азоту і максимально допустимого часу рейсу

20-футовий	a, м	b, м	L, м	B, м	H, м	Q, кДж/с	M _{cargo} , т	τ, год	G _{N₂} , кг/год	n, цикл.	G, кг/доб.	T _{voy} , діб
Євро	1,2	0,8	5,75	2,35	2,39	3,42	12,10	3,35	33,43	7,17	239,69	5,41
Фінська	1,2	1,0	5,75	2,35	2,39	3,42	11,89	3,29	33,43	7,29	243,82	5,32
Американська	1,2	1,2	5,75	2,35	2,39	3,42	11,69	3,23	33,43	7,42	248,08	7,84
40-футовий												
Євро	1,2	0,8	12,03	2,35	2,39	6,48	26,21	3,82	63,42	6,28	398,34	3,25
Фінська	1,2	1,0	12,03	2,35	2,39	6,48	26,00	3,79	63,42	6,33	401,47	3,23
Американська	1,2	1,2	12,03	2,35	2,39	6,48	25,79	3,76	63,42	6,38	404,65	4,81
40-футовий hc												
Євро	1,2	0,8	12,00	2,35	2,65	6,85	28,97	3,99	67,05	6,01	402,79	3,61
Фінська	1,2	1,0	12,00	2,35	2,65	6,85	28,75	3,96	67,05	6,06	406,00	3,58
Американська	1,2	1,2	12,00	2,35	2,65	6,85	28,52	3,93	67,05	6,10	409,27	5,33

На основі отриманих у табл. 1, 2 результатів можна дійти висновку, що використання запропонованої кріогенної установки у класичному 20-футовому контейнері є найбільш оптимальним щодо витрат холодоагенту відносно часу доставлення у випадку перевезення замороженого м'яса за температури -20 °С. При цьому рекомендовано за можливості використовувати саме американський

варіант палети-підставки розміром 1200x1200 мм, адже це дає максимальний ефект щодо витрат за добу часу, до того ж палета 1200x1200 мм має найбільш вдалу форму конструкції для розміщення на ній максимальної кількості кріоємностей.

Розрахунки виконано для екстремальних умов перевезення і зберігання мороженого м'яса. Навряд температура навколишнього середовища

буде цілодобово дорівнювати +50 °С, а тим більше протягом сумарного часу морського, залізничного і автомобільного перевезення, наприклад, мороженого м'яса. Тому дійсні терміни дієздатності розрахованого контейнера будуть тільки збільшуватися.

Основні чинники, що впливають на витрати азоту для перевезення, і відповідно обмеження в часі перевезення:

- температура навколишнього середовища;
- температура перевезення вантажу;
- теплофізичні характеристики вантажу;
- швидкість руху ІТО (транспортного засобу);
- розміри та матеріали стінок ІТО;
- кількість і якість ізоляції, яку буде змонтовано.

Виходячи з чинників, що впливають на витрати холодоагенту, рекомендовано для більш точних значень витрат здійснювати такі розрахунки для кожного відрізка рейсу

окремо, оскільки температура зовнішнього середовища під час доставлення може суттєво відрізнятися в пункті відправлення та призначення. Також слід урахувати швидкість переміщення ІТО (швидкість і тип транспортного засобу) у конкретний момент доставлення.

Висновки. 1. Доведено можливість використання зрідженого азоту як холодоагенту для перевезення вантажів, що потребують охолодження.

2. Розроблено в першому наближенні технологічні операції з переобладнання класичної ІТО у рефрижераторну шляхом встановлення в ІТО знімного термовкладиша з газифікатором, заповненим рідким азотом (іншим зрідженим холодоагентом).

3. Надано методику розрахунку витрат холодоагенту запропонованою установкою під час виконання рейсу в заданих кліматичних умовах.

Список використаної літератури

1. Ломейко О. П. Вакуумне охолодження – перспективний спосіб зберігання рослинної сировини у сільському господарстві. *Праці Таврійської державної агротехнічної академії*. 2007. № 7. С. 116–122.
2. Алмати Э., Эрдели Л., Шарей Т. Быстрое замораживание пищевых продуктов. Москва: Легкая и пищевая промышленность, 1981. 106 с.
3. Рогов И. А., Куцакова В. Е., Филлипова В. И., Фролов С. В. Консервирование пищевых продуктов холодом. Москва: Колос, 1999. 168 с.
4. Подмазко О. С., Піщанська Н. О. Суднова холодильна техніка. Одеса, 2020. 59 с.
5. Флауменбаум Б. Л. Технология консервирования плодов, овощей, мяса и рыбы. Изд. 2-е, перер. и доп. Москва: Колос, 1993. 320 с.
6. Мазур А., Ковганко Р., Акулов В. Способи охолодження. *Технології переробки та упаковки*. 2002. № 4.
7. Масліков М. М. Холодильна технологія харчових продуктів: навч. посіб. Київ: НУХТ, 2007. 335 с.
8. Войтенко О. О., Братішко В. В. Особливості перевезення швидкопсувних вантажів. 2020. С. 78–79.
9. Холодильні установки рефрижераторного рухомого складу: навч. посіб. / І. Е. Мартинов, В. М. Іщенко, Н. С. Брайковська та ін. Харків: УкрДАЗТ, 2013. 135 с.
10. Кириллова О. В. Теоретико-множественный подход к формализации логических отношений между понятиями «транспортная», «транспортно-технологическая» и «логистическая» системы. *Вісник ОНМУ*. 2014. № 1. С. 153–175.
11. Швецов Г. М., Ладин Н. В. Судовые холодильные установки. Москва: Транспорт, 1986. 232 с.

12. Жидкий азот. Кріогенсервіс. 2023. URL: <http://cryogen.com.ua/catalog/liquefied-gases/liquid-nitrogen/>.
13. Ступак Ю. О., Васильківський К. В. Використання азоту в пакувальних технологіях. *Новітні технології пакування : матеріали доповідей XV науково-практичної конференції молодих вчених*. Київ, 2016. С. 35-37. URL: <https://dspace.nuft.edu.ua/items/688b1721-555d-491e-a2e3-84b3c67272c4>.
14. Штанько О. А., Сімахіна Г. О. Перспективи отримання з побічних продуктів цукробурякового виробництва біологічно активних харчових добавок. *Наукові праці НУХТ*. 2004. №15. С. 55-58.
15. Охлаждение транспортного средства для перевозки пищевых продуктов с применением жидкого азота / Х. Педолски, Р. Гаврилов, В. Савельев та ін. 2001. № 1. С. 1–9.
16. Устройство для низкотемпературного охлаждения изотермического контейнера / Е. А. Амелин, В. М. Бойчук, А. Ф. Бондарь, Ю. Г. Леонов. SU1064091A1. 1983. URL: <https://patenton.ru/patent/SU1064091A1>.
17. Бондаренко В. И., Носик Л. Г. Рефрижератор. SU1204888A1. 1986. URL: <https://patenton.ru/patent/SU1204888A1>.
18. Сайт компанії Arivapak. URL: <https://arivapak.com/products/termovkladyshe-v-kontejner/>.
19. Термовкладыш THERMAL CONTAINER LINER: простое и доступное решение проблемы судоходной транспортировки вина. *Наної. Технології та Інновації*. 2017. URL: <https://techdrinks.info/termovkladysh-thermal-container-liner-prostoe-y-dostupnoe-reshenye-problemyi-sudokhodnoy-transportyrovky-vyna/>.
20. Сайт компанії «Cryo Inter Trading». 2024. URL: <https://cryo-tm.com.ua/uk/stacionarni-kriogenni-yemnosti-ta-rezervuari/548-stacionarnye-kriogennye-yomkosti-dlya-khraneniya.html>.
21. Сайт «Mathvox». URL: <https://mathvox.wiki/geometria/mnogougolniki/glava-5-pryamougolnik-i-ego-svoistva/esli-v-pryamougolnik-vpisana-okrujnost/>.
22. Розміри морських контейнерів. URL: <https://partnertrade.org/ua/dani-po-kontejneram/>.
23. Сайт EPAL Euro Pallet Association e.V. (EPAL). 2024. URL: <https://www.epal-pallets.org/eu-en/load-carriers/epal-euro-pallet>.
24. Рідкий азот: продаж, ціна. URL: <https://co2service.com.ua/ua/p1860712372-zhidkij-azot.html>.
25. Михеев М. А., Михеева И. М. Основы теплопередачи. Москва: Энергия, 1973. 271 с.
26. Спінений поліетилен. Сайт компанії «Liderpak». 2024. URL: <https://www.liderpak.ua/product-category/packs/foamed-polyethylene/>.
27. Вассерман О. А., Слинько О. Г. Технічна термодинаміка і теплообмін: підручник. Одеса: Вид-во «Фенікс», 2019. 494 с.
28. Загоруйко В. О., Голіков О. А. Суднова холодильна техніка. Київ: Наукова думка, 2002. 575 с.

Слинько Олексій Григорович, кандидат технічних наук, професор кафедри суднових енергетичних установок та технічної експлуатації, Одеський національний морський університет. E-mail: asg_37@ukr.net. ORCID iD 0000-0002-5310-4335.

Столянов Владислав Андрійович, аспірант кафедри експлуатації флоту і технології морських перевезень, Одеський національний морський університет. Тел.: +38(066)789-70-31. E-mail: wladislaw5009@gmail.com.

Slynko Oleksii Hryhorovych, Cand. Technical Sc., professor the Chair of Ship Power Plants and Technical Operation, Odesa National Maritime University. E-mail: asg_37@ukr.net. ORCID iD 0000-0002-5310-4335.
Stolianov Vladyslav Andriiovych, Post-Graduate Student the Chair of Fleet operation and shipping technology, Odesa National Maritime University. Tel.: +38(066)789-70-31. E-mail: wladislaw5009@gmail.com.

Статтю прийнято 18.02.2025 р.