

Міністерство освіти і науки України
Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова
Херсонський навчально-науковий інститут

Кафедра теплотехніки

«Допущений до захисту»

 Завідувач кафедри теплотехніки
к.т.н., доцент Г.О. Кобалава
« 10 » червня 2026 р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

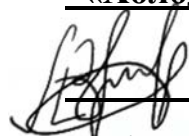
на здобуття ступеня вищої освіти «бакалавр»

на тему: «Розробка проєкту холодильної установки для провізійних комор універсального суховантажного судна «SIDER KING» дедвейтом $D_w = 15700$ т»

Виконав: студент IV курсу, групи 4257ст
спеціальності

142 «Енергетичне машинобудування»
(шифр і назва спеціальності)

«Холодильні машини і установки»
(назва освітньо-професійної програми)



Андрій ДРОЧЕНКО
(прізвище та ініціали)

Керівник

Роман РАДЧЕНКО
(прізвище та ініціали)

Рецензент

Віктор САМОХВАЛОВ
(прізвище та ініціали)

Херсон – 2026

Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова

(повне найменування вищого навчального закладу)

Інститут, факультет ХННІ НУК, енерготехнічний факультет

Кафедра теплотехніки

Рівень вищої освіти перший (бакалаврський)

Галузь знань 14 «Електрична інженерія»

(шифр і назва)

Спеціальність 142 «Енергетичне машинобудування»

(шифр і назва)

Освітньо-професійна програма «Холодильні машини і установки»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Гарант освітньої програми

к.т.н., доц. І.В. Калініченко

« 22 » квітня 2026 року

З А В Д А Н Н Я
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ
на здобуття ступеня вищої освіти «бакалавр»

здобувача **Дроченко Андрія Вікторовича, група 4257ст**

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи **«Розробка проєкту холодильної установки для провізійних комор
універсального суховантажного судна «SIDER KING» дедвейтом $Dw = 15700$ т»**

керівник роботи **Радченко Роман Миколайович, к.т.н., доцент**

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом ректора НУК від « 22 » квітня 2026 року № 293уч

2. Термін подання студентом роботи « 10 » червня 2026 року.

3. Зміст розрахунково-пояснювальної записки

Вступ.

Розділ 1. Загальна характеристика об'єкту, комплексу рефрижерації. Технічні дані судна, аналіз експлуатаційних режимів та енергетичної установки.

Розділ 2. Теплові розрахунки комплексу рефрижерації.

2.1. Вибір параметрів повітря та води в залежності від району плавання судна та параметрів продуктів, що зберігаються.

2.2. Вибір ізоляційних конструкцій огорож приміщення, що охолоджуються.

2.3. Визначення сумарного теплопритоку і холодопродуктивності СХУ.

2.4. Вибір системи охолодження та холодильного агенту.

Розділ 3. Проєктування холодильної машини.

3.1. Побудова циклу холодильної машини на ph -діаграмі та його розрахунок.

3.2. Підбір холодильного компресора, теплообмінних апаратів та іншого устаткування холодильної установки.

3.3. Розміщення обладнання холодильної установки.

Розділ 4. Автоматизація та специфікація обладнання СХУ.

4.1. Підбір допоміжного обладнання та лінійної автоматики.

4.2. Система автоматичного захисту та контролю.

4.3. Специфікація основного обладнання та засобів автоматизації.

Розділ 5. Охорона праці.

Висновки.

Список використаних літературних джерел.

Розрахунково-пояснювальна записка (60...80 сторінок тексту) повинна відповідати вимогам ЄСКД та ДСТУ.

4. Перелік графічного матеріалу

1. Креслення приміщення, що охолоджується, з ізоляцією та приладами охолодження – 1 аркуш формату А1.
2. Принципова схема та цикл холодильної машини на pI -діаграмі – 1 аркуш формату А2.
3. Компонувальне креслення компресора, компресорно-конденсаторного агрегату або холодильної машини – 1 аркуш формату А1.
4. Креслення теплообмінника _____ – 1 аркуш формату А1.

5. Дата видачі завдання « 22 » квітня 2026 року.

Дата представлення на кафедру « 10 » червня 2026 року.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів випускної магістерської роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1.	Вступ + розділ 1	28 квітня	вик
2.	Розділ 2 + креслення приміщення, що охолоджується	до 07 травня	вик
3.	Розділ 3 + креслення принципової схеми та циклу холодильної машини на pI -діаграмі	до 15 травня	вик
4.	Компонувальне креслення компресора, компресорно-конденсаторного агрегату або холодильної машини	до 23 травня	вик
5.	Розділ 4 + креслення теплообмінника	до 02 червня	вик
6.	Розділ 5 + висновки	до 06 червня	вик
7.	Остаточне оформлення розрахунково-пояснювальної записки та графічного матеріалу; подання кваліфікаційної бакалаврської роботи на кафедру	до 10 червня	вик

Здобувач


(підпис)

Андрій ДРОЧЕНКО
(прізвище та ініціали)

Керівник роботи


(підпис)

Роман РАДЧЕНКО
(прізвище та ініціали)

АНОТАЦІЯ

Дроченко Андрій Вікторович, група 4257ст.

Кваліфікаційну бакалаврську роботу виконано за темою: «Розробка проєкту холодильної установки для провізійних комор універсального суховантажного судна «SIDER KING» дедвейтом $Dw = 15700$ т».

Кваліфікаційна робота на здобуття кваліфікації бакалавр за спеціальністю 142 Енергетичне машинобудування (освітньо-професійна програма «Холодильні машини і установки»). Херсонський навчально-науковий інститут Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова, Херсон, 2026 р.

Кваліфікаційна робота присвячена модернізації та розрахунку суднової холодильної установки (СХУ) прямого охолодження для комплексу провізійних комор суховантажу «SIDER KING» (екіпаж 25 осіб) із переведенням системи на сучасний екологічний холодоагент R448A.

В ході виконання роботи було визначено оптимальні температурно-вологісні режими зберігання продуктів для умов плавання в тропічних широтах. Виконано теплотехнічний розрахунок огорожень камер із використанням пінополіуретанової ізоляції, розроблено конструкцію посиленої палуби типу «плаваючої підлоги» та сформовано зведений тепловий баланс комплексу комор, який склав 1595,4 Вт. На основі побудованого термодинамічного циклу визначено проєктну холодопродуктивність установки (2,4 кВт). За розрахунковими параметрами підібрано основне обладнання компанії Bitzer: напівгерметичний поршневий компресор 2CES-3Y (50 Гц) потужністю 3,12 кВт та кожухотрубний конденсатор морського виконання K073H. Також обрано підвісні повітроохолоджувачі серії ECO STE та комплектуючі лінійної автоматики й захисту Danfoss. Розроблено схему автоматичного захисту компресора від аварійних режимів за тиском і температурою. Результати роботи мають практичну цінність для підвищення енергоефективності судна та його повної відповідності вимогам Додатка VI Конвенції МАРПОЛ щодо обмеження глобального потепління.

Ключові слова: судна холодильна установка, провізійні комори, холодоагент R448A, компресор Bitzer.

					<i>КРБ.142.4257ст.01.05.ПЗ.00</i>	Арк.
						4
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

ABSTRACT

Andrii Drochenko, group 4257st.

Bachelor's Thesis Title: "Development of a Refrigeration Plant Project for the Provision Stores of Universal Dry Cargo Vessel "SIDER KING" ($D_w = 15,700$ t)."

Bachelor's thesis for the degree of bachelor in specialism 142 Power Machinery (Educational and Professional Program "Refrigerating Machines and Plants"). Kherson Educational-Scientific Institute of Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Kherson, 2026.

This thesis is dedicated to the modernization and calculation of a direct expansion marine refrigeration plant for the provision store complex of the cargo vessel "SIDER KING" (crew of 25 people), with the transition of the system to the modern eco-friendly refrigerant R448A.

In the course of the work, the optimal temperature and humidity conditions for food storage during navigation in tropical latitudes were determined. Thermal calculation of the chamber boundaries using polyurethane insulation was performed, the construction of a reinforced "floating floor" deck was developed, and a total heat balance of the store complex was formed, which amounted to 1,595.4 W. Based on the constructed thermodynamic cycle, the design cooling capacity of the plant (2.4 kW) was determined. According to the calculated parameters, the main equipment from Bitzer was selected: a semi-hermetic reciprocating compressor 2CES-3Y (50 Hz) with a capacity of 3.12 kW and a marine shell-and-tube condenser K073H. Suspended unit coolers of the ECO CTE series and components of Danfoss line automation and protection were also selected. A system for automatic protection of the compressor against emergency modes in terms of pressure and temperature has been developed. The results of the work are of practical value for improving the energy efficiency of the vessel and its full compliance with the requirements of Annex VI of the MARPOL Convention regarding the mitigation of global warming.

Keywords: marine refrigeration plant, provision stores, R448A refrigerant, Bitzer compressor.

					<i>КРБ.142.4257cm.01.05.ПЗ.00</i>	Арк.
						5
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ І СКОРОЧЕНЬ	8
ВСТУП	10
РОЗДІЛ 1. ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА ОБ'ЄКТУ, КОМПЛЕКСУ РЕФРИЖЕРАЦІЇ	13
1.1. Загальні відомості.....	13
1.2. Основні технічні характеристики судна.	15
1.3. Експлуатаційні режими.....	16
1.4. Енергетична установка.	17
1.5. Склад та призначення провізійних комор.....	18
1.6. Висновки за розділом 1.....	19
РОЗДІЛ 2. ТЕПЛОВІ РОЗРАХУНКИ КОМПЛЕКСУ РЕФРИЖЕРАЦІЇ.....	21
2.1. Вибір параметрів повітря та води в залежності від району плавання судна та параметрів продуктів, що зберігаються.....	21
2.2. Вибір ізоляційних конструкцій огорож приміщення, що охолоджуються.	23
2.3. Визначення сумарного теплопритоку і холодопродуктивності СХУ.....	27
2.4. Вибір системи охолодження та холодильного агенту.....	32
2.5. Висновки за розділом 2.....	34
РОЗДІЛ 3. ПРОЄКТУВАННЯ ХОЛОДИЛЬНОЇ МАШИНИ	37
3.1. Побудова циклу холодильної машини на p, h -діаграмі та його розрахунок.....	37
3.2. Підбір холодильного компресора, теплообмінних апаратів та іншого устаткування холодильної установки.....	39
3.3. Розміщення обладнання холодильної установки у приміщенні.....	47
3.4. Висновки за розділом 3.....	49
РОЗДІЛ 4. АВТОМАТИЗАЦІЯ ТА СПЕЦИФІКАЦІЯ ОБЛАДНАННЯ СХУ... ..	52
4.1. Підбір допоміжного обладнання та лінійної автоматики.	52
4.2. Система автоматичного захисту та контролю.....	53

					КРБ.142.4257см.01.05.ПЗ.00	Арк.
						6
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

4.3. Специфікація основного обладнання та засобів автоматизації.....	55
4.4. Висновки по розділу 4.....	55
РОЗДІЛ 5. ОХОРОНА ПРАЦІ.....	58
5.1. Особливості технічної експлуатації СХУ на сумішах HFO/HFC (R448A).	58
5.2. Вимоги охорони праці та техніки безпеки при обслуговуванні установки.....	59
5.3. Заходи з екологічної безпеки згідно з Конвенцією МАРПОЛ.	59
5.4. Висновки за розділом 5.....	60
ВИСНОВКИ	61
ЛІТЕРАТУРА	63
ДОДАТОК	65

					КРБ.142.4257см.01.05.ПЗ.00	Арк.
						7
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ І СКОРОЧЕНЬ

Символи та фізичні величини:

- Q_0 – холодопродуктивність холодильної установки, кВт;
 Q_Σ – сумарний тепловий потік (теплове навантаження), кВт;
 p_0 – тиск всмоктування (кипіння) холодоагенту, МПа;
 p_k – тиск нагнітання (конденсації) холодоагенту, МПа;
 t_0 – розрахункова температура кипіння холодоагенту, °С;
 t_k – розрахункова температура конденсації холодоагенту, °С;
 $\Delta t_{\text{пер}}$ – величина перегріву пари холодоагенту, К;
 $\Delta t_{\text{по}}$ – величина переохолодження рідкого холодоагенту, К;
 h – питома ентальпія холодоагенту, кДж/кг;
 s – питома ентропія холодоагенту, кДж/(кг·К);
 v – питомий об'єм пари холодоагенту, м³/кг;
 G_m – масова витрата холодоагенту в циклі, кг/с;
 V_h – теоретичний об'єм, що описується поршнями компресора, м³/год;
 ε (COP) – теоретичний холодильний коефіцієнт циклу;
 λ – коефіцієнт подачі компресора;
 π – відношення тисків у ступені стиснення;
 k – коефіцієнт теплопередачі огороження, Вт/(м²·К).

Абревіатури та скорочення:

- СХУ – суднова холодильна установка;
ПКХМ – парокompresійна холодильна машина;
ПТО – пластинчастий теплообмінник;
ЕРВ – електронний розширювальний вентиль;
ТРВ – терморегулюючий вентиль;
ТЕН – трубчастий електронагрівач (елемент відтавання);
МАРПОЛ (MARPOL) – Міжнародна конвенція по запобіганню забрудненню з суден;

					КРБ.142.4257см.01.05.ПЗ.00	Арк.
						8
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

СОЛАС (SOLAS) – Міжнародна конвенція з охорони людського життя на морі;

ASHRAE — Американське товариство інженерів з опалення, охолодження та кондиціювання повітря;

GWP (Global Warming Potential) – потенціал глобального потепління;

ODP (Ozone Depletion Potential) – потенціал руйнування озонowego шару;

COP (Coefficient of Performance) – енергетичний (холодильний) коефіцієнт

Dw – дедвейт судна (повна вантажопідйомність), т.

					<i>КРБ.142.4257см.01.05.ПЗ.00</i>	Арк.
						9
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

ВСТУП

Сучасний етап розвитку світового торговельного флоту характеризується підвищенням вимог до експлуатаційної надійності, енергетичної ефективності та екологічної безпеки судових систем. Універсальні суховантажні судна, до яких належить «SIDER KING» дедвейтом $D_w = 15700$ т, відіграють ключову роль у морських перевезеннях, забезпечуючи доставку широкої номенклатури вантажів у різні регіони світу. Тривалість автономних рейсів таких суден висуває високі вимоги до систем забезпечення життєдіяльності екіпажу, серед яких одне з найважливіших місць посідає суднова холодильна установка (СХУ) для провізійних комор.

Ефективне функціонування СХУ безпосередньо впливає на збереження якості та поживних властивостей харчових продуктів, що є необхідною умовою для підтримання здоров'я та працездатності моряків. Технічний стан і досконалість холодильного обладнання визначають не лише умови зберігання провізії, а й загальні показники енергоспоживання судна, оскільки холодильні машини є потужними споживачами електроенергії в структурі енергетичної установки. Сьогодні проектування СХУ стикається з низкою викликів. По-перше, це необхідність дотримання жорстких міжнародних екологічних норм, зокрема вимог Додатку VI Конвенції МАРПОЛ 73/78 та нового Регламенту ЄС 2024/573 щодо фторованих парникових газів, які спрямовані на поетапну відмову від холодоагентів з високим потенціалом глобального потепління (GWP). По-друге, перехід до автоматизованого управління та інтелектуального моніторингу роботи СХУ дозволяє суттєво знизити експлуатаційні витрати та мінімізувати вплив людського фактора на безпеку мореплавства.

Отже, розробка сучасного проекту холодильної установки для судна «SIDER KING» із застосуванням енергоефективного обладнання та екологічно безпечних робочих речовин є актуальним науково-технічним завданням, що має безпосереднє практичне значення для суднобудівної галузі України.

					КРБ.142.4257см.01.05.ПЗ.00	Арк.
						10
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

Метою роботи є розробка проекту холодильної установки для провізійних комор універсального суховантажного судна «SIDER KING» дедвейтом 15700 т, що забезпечить підтримання заданих температурно-вологісних режимів за умов мінімальних енергетичних витрат та повної відповідності екологічним стандартам.

Об'єктом дослідження є процес забезпечення та підтримання заданих параметрів температурно-вологісного режиму в охолоджувані приміщеннях (провізійних коморах) суховантажного судна.

Предметом дослідження є технічні характеристики, конструктивні особливості та режими роботи суднової холодильної установки, а також методи підвищення її енергетичної та екологічної ефективності.

Для досягнення поставленої мети у кваліфікаційній роботі необхідно вирішити такі завдання:

1. Провести аналіз об'єкта проектування та визначити розрахункові умови експлуатації в необмеженому районі плавання.
2. Виконати теплові розрахунки комплексу рефрижерації, включаючи вибір ізоляційних конструкцій та розрахунок теплоприпливів.
3. Обґрунтувати вибір холодильного агенту та системи охолодження з урахуванням вимог безпеки та екології.
4. Спроекувати цикл парокомпресійної холодильної машини (ПКХМ) та виконати його термодинамічний розрахунок.
5. Здійснити підбір основного та допоміжного обладнання (компресорів, теплообмінників, лінійної автоматики) на основі сучасних інженерних методик та програмного забезпечення (наприклад, Bitzer Software).
6. Розробити заходи з автоматизації, контролю та безпечної експлуатації установки в судових умовах.

Структура та обсяг кваліфікаційної роботи. Робота складається зі вступу, п'яти розділів, висновків, списку використаних джерел. Загальний обсяг розрахунково-пояснювальної записки становить 65 сторінки, 6 рисунків та 9 таблиць.

					<i>КРБ.142.4257см.01.05.ПЗ.00</i>	Арк.
						11
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

					КРБ.142.4257см.01.05.ПЗ.01			
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	Розділ 1	Літ.	Арк.	Аркушів
Студент		Дроченко А.В.						
Керівник		Радченко Р.М.						
Консульт.								
Зав.каф.		Кобалава Г.О.				ХННІ НУК 12		

РОЗДІЛ 1. ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА ОБ'ЄКТУ, КОМПЛЕКСУ РЕФРИЖЕРАЦІЇ

1.1. Загальні відомості.

1.1.1. Тип і призначення судна

Судно «SIDER KING» за своїм типом є універсальним суховантажним судном (General Cargo Ship) дедвейтом $D_w = 15700$ т. Воно призначене для морського перевезення широкої номенклатури вантажів, включаючи генеральні вантажі в упаковці або палетах, великовагові та великогабаритні конструкції, навалювальні вантажі (зерно, вугілля), а також контейнери міжнародного стандарту ISO. Судно забезпечує високу гнучкість при вантажних операціях завдяки наявності власних вантажних кранів.

1.1.2. Район плавання та умови експлуатації

Район плавання судна – необмежений, що дозволяє здійснювати рейси в усіх океанських та морських зонах. Основними регіонами експлуатації є Атлантичний та Індійський океани, порти Середземномор'я, Північної Європи та Південно-Східної Азії. Враховуючи глобальний характер перевезень, судно спроектоване для роботи в умовах тропічного клімату. Розрахунковими параметрами зовнішнього середовища для проектування судових систем прийнято:

- Температура зовнішнього повітря: $+35^{\circ}\text{C}$.
- Температура забортної води: $+32^{\circ}\text{C}$.
- Відносна вологість повітря: 70-80 %.

1.1.3. Архітектурно-конструктивний тип судна

Судно – одногвинтове, однопалубне, з надбудовою та машинним відділенням, розташованими в кормовій частині. Корпус судна сталевий, суцільнозварний, розділений водонепроникними перебірками. Судно має похилий форштевень з бульбоподібним краєм для покращення гідродинамічних

					КРБ.142.4257см.01.05.ПЗ.01	Арк.
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		13

характеристик та транцеву корму. Вантажна частина складається з кількох трюмів, закритих люковими закриттями типу «foldtite». Система набору корпусу – змішана, з посиленням подвійним дном та подвійними бортами для забезпечення безпеки плавання.

1.1.4. Клас судна.

Судно побудоване під наглядом класифікаційного товариства RINA (або аналогічного члена IACS, як Bureau Veritas чи ABS) і відповідає вимогам міжнародних конвенцій SOLAS, MARPOL та чинним правилам Регістру щодо суднових холодильних установок.



Рис. 1.1. Загальний вигляд універсального суховантажного судна «SIDER KING».

1.1.5. Морехідні якості судна

Судно має високі показники плавучості, остійності та непотоплюваності, що забезпечують безпечне маневрування при повному завантаженні у штормових умовах. Завдяки головному двигуну потужністю біля 5000 кВт, судно розвиває експлуатаційну швидкість до 13-14 вузлів. Наявність носового підрулювального пристрою та сучасної системи навігації гарантує відмінну керованість у вузькостях та при швартовних операціях. Параметри качки мінімізовані конструкцією корпусу, що сприяє збереженню вантажу та комфорту екіпажу.

					КРБ.142.4257см.01.05.ПЗ.01	Арк.
						14
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

1.2. Основні технічні характеристики судна.

Об'єктом проектування є суднова холодильна установка (СХУ) для провізійних комор універсального суховантажного судна (General Cargo Ship) «SIDER KING». Судно належить до класу Handysize, що характеризується високою маневреністю та можливістю заходу в порти з обмеженими глибинами, виконуючи перевезення широкого спектра генеральних та насипних вантажів. Основні технічні характеристики судна представлені в таблиці 1.1.

Таблиця 1.1. Основні розмірні характеристики суховантажного судна «SIDER KING».

Параметр	Значення
Довжина найбільша, м	140,0
Ширина, м	23,0
Висота борту, м	12,1
Осадка по КВЛ, м	8,6
Дедвейт, т	15700
Експлуатаційна швидкість, вузли	13,5
Кількість екіпажу, осіб	25
Автономність за запасами провізії, доби	30-45

Дані характеристики безпосередньо впливають на розрахунок комплексу рефрижерації. Зокрема, кількість екіпажу (25 осіб) є визначальним фактором для встановлення необхідних об'ємів провізійних комор, а район плавання та осадка судна визначають параметри заборотної води для охолодження конденсаторів холодильної машини.

Судно обладнане сучасними засобами автоматизації та контролю, що вимагає від холодильної установки відповідності високим стандартам надійності та можливості інтеграції в загальносуднову систему управління. Геометричні розміри корпусу та розташування надбудови дозволяють оптимально розмістити блок провізійних комор у кормовій частині, забезпечуючи мінімальну довжину фреонових магістралей та зручну логістику при постачанні судна.

1.3. Експлуатаційні режими.

Функціонування суднової холодильної установки (СХУ) провізійних комор характеризується значною нерівномірністю теплового навантаження, що зумовлено зміною зовнішніх кліматичних умов, режимами експлуатації судна та технологічними процесами обробки продуктів. Згідно з технічним завданням, для холодильної установки судна «SIDER KING» характерні три основні режими роботи:

1. Режим завантаження (приймання) провізії.

Цей режим є найбільш напруженим з точки зору теплового навантаження на компресорне обладнання. Він триває з моменту масового надходження свіжих продуктів на борт судна в порту до моменту їх охолодження (або заморожування) до температури зберігання.

У камери одночасно надходить значна кількість теплоти від неохолоджених продуктів, а також через тривале відкриття дверей при вантажних операціях.

Система повинна забезпечити зниження температури провізії до заданих значень протягом нормованого часу (зазвичай не більше 24 годин).

2. Ходовий режим.

Даний режим є основним і займає більшу частину часу експлуатації СХУ під час переходів судна у відкритому морі.

Холодильна машина працює на компенсацію теплоприпливів через ізоляцію від зовнішнього повітря та суміжних приміщень, а також внутрішніх тепловиділень (вентилятори, освітлення).

Оскільки судно має необмежений район плавання, розрахунок цього режиму проводиться для найбільш несприятливих тропічних умов: температура зовнішнього повітря $+35^{\circ}\text{C}$ та температура заборотної води $+32^{\circ}\text{C}$. У цьому режимі установка працює в автоматичному циклічному режимі з періодичними зупинками компресора за сигналами термостатів.

3. Стояночний режим.

					<i>КРБ.142.4257см.01.05.ПЗ.01</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		16

Режим роботи судна під час стоянки в порту або на рейді.

Характеризується підвищеною частотою відкривання дверей комор для щоденного вибору продуктів коком на потреби екіпажу (25 осіб). Це призводить до інтенсивного вологоприпливу в камери та швидкого обмерзання випарників (повітроохолоджувачів).

Навантаження в цьому режимі зазвичай нижче, ніж при завантаженні, але вище, ніж у чистому ходовому режимі без доступу персоналу до комор. Система автоматизації повинна надійно підтримувати стабільність температурного поля при частих збуреннях.

1.4. Енергетична установка.

Енергетична установка судна «SIDER KING» забезпечує необхідну потужність для руху судна, а також генерує електричну та теплову енергію для функціонування всіх загальносуднових систем, включаючи судновий комплекс рефрижерації провізійних комор.

Як головний двигун (ГД) на судні встановлено малооборотний двотактний дизель фірми MAN B&W моделі 6S35MC.

Двигун має наступні характеристики:

Кількість циліндрів: 6.

Номінальна потужність: біля 4500–5200 кВт.

Частота обертання: 170–173 об/хв.

ГД працює безпосередньо на гребний гвинт фіксованого кроку. Потужність головного двигуна забезпечує судну стабільну експлуатаційну швидкість, що важливо для дотримання термінів доставки провізії та автономності судна.

Вироблення електроенергії для потреб судна, зокрема для живлення компресорів холодильної установки, здійснюється судновою електростанцією

					<i>КРБ.142.4257см.01.05.ПЗ.01</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		17

(СЕС). До її складу входять три допоміжні дизель-генератори (ДГ) потужністю по 550–600 кВт кожен.

Параметри мережі – трифазний змінний струм, напруга 440 В, частота 60 Гц.

Живлення СХУ. Електродвигуни компресорів та вентиляторів повітроохолоджувачів підключаються до головного розподільного щита (ГРЩ). Система автоматизації холодильної установки має власну систему захисту від перепадів напруги та знеструмлення.

Системи охолодження та інтеграція СХУ

Конденсатор холодильної установки потребує постійного відведення теплоти. На судні «SIDER KING» реалізована система охолодження забортною водою. Подача води до конденсаторів СХУ здійснюється від центральної системи охолодження допоміжних механізмів або за допомогою окремого автономного насоса забортної води. Враховуючи район плавання, система розрахована на ефективну роботу при температурі води до +32°C. Наявність аварійного дизель-генератора (АДГ) гарантує можливість живлення систем контролю та сигналізації холодильної установки у випадку аварійної зупинки основної електростанції, що дозволяє уникати неконтрольованого зростання температури в коморах.

1.5. Склад та призначення провізійних комор.

Комплекс провізійних комор призначений для забезпечення екіпажу (25 осіб) продуктами харчування належної якості протягом усього автономного рейсу. Згідно з санітарними нормами та технологічними вимогами зберігання, комори розділені на декілька температурних зон залежно від виду продуктів.

Склад комплексу та необхідні параметри середовища наведені у таблиці 1.2.

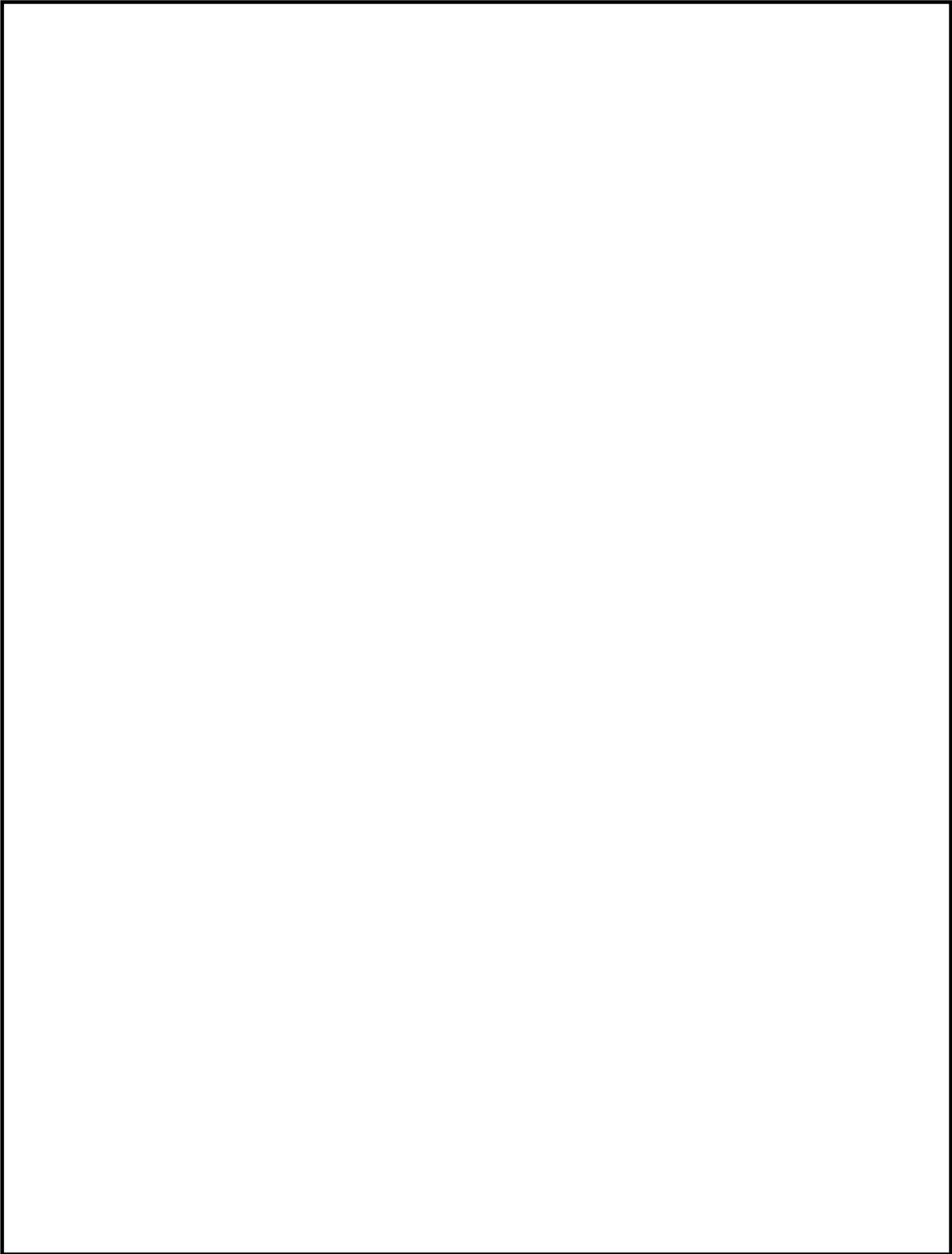
					КРБ.142.4257см.01.05.ПЗ.01	Арк.
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		18

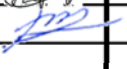
Таблиця 1.2. Основні розмірні характеристики суховантажного судна «SIDER KING».

Назва камери	Об'єм, м ³	Температурний режим, °С	Призначення
Камера м'яса та риби	25	-18 ... -25	Зберігання замороженої продукції
Камера овочів та фруктів	20	+2 ... +4	Зберігання свіжої плодоовочевої продукції
Камера сухої провізії / молочна	15	+4 ... +10	Зберігання молочних продуктів, напоїв, яєць

1.6. Висновки за розділом 1.

У першому розділі проведено аналіз об'єкта проектування та умов його експлуатації, що дозволило сформувати базу для подальших теплотехнічних розрахунків.



					КРБ.142.4257см.01.05.ПЗ.02				
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	Розділ 2	Літ.	Арк.	Аркушів	
Студент		Дроченко А.В.							
Керівник		Радченко Р.М.							
						ХННІ НУК			
Консульт.									
Зав.каф.		Кобалава Г.О.			20				

РОЗДІЛ 2. ТЕПЛОВІ РОЗРАХУНКИ КОМПЛЕКСУ РЕФРИЖЕРАЦІЇ.

2.1. Вибір параметрів повітря та води в залежності від району плавання судна та параметрів продуктів, що зберігаються.

Ефективність та надійність суднової холодильної установки (СХУ) залежать від правильного вибору розрахункових температур навколишнього середовища та внутрішніх параметрів у камерах. Для судна «SIDER KING» ці параметри обираються відповідно до вимог Регістру судноплавства та санітарних норм зберігання харчових продуктів.

Розрахунковими параметрами повітря є температура t , вологовміст d , відносна вологість φ , ентальпія h , вміст шкідливих газів, швидкість руху v .

Температура t характеризує ступінь нагріву повітря, вимірюється в $^{\circ}\text{C}$.

Відповідно до закону Дальтона барометричний тиск вологого повітря P_b (Па) дорівнює сумі парціальних тисків його сухої частини P_d і водяної пари P_w : $P_b = P_d + P_w$.

Густина вологого повітря ($\text{кг}/\text{м}^3$) є його маса в одиниці об'єму. У розрахунках густина вологого повітря приймають рівною густині сухої його частини.

Вологовміст d ($\text{кг} / \text{кг}$ або $\text{г} / \text{кг}$) називається маса водяної пари, яка припадає на 1 кг сухого повітря або міститься в $(1 + d)$ кг вологого повітря.

Відносною вологістю повітря φ називають ступінь насичення повітря вологою. Це відношення парціального тиску пари P_p до тиску насиченої пари P_s за тієї самої температури:

$$\varphi = \frac{P_p}{P_s} \cdot 100\%$$

Питома ентальпія h ($\text{кДж}/\text{кг}$) – кількість теплоти, необхідна для нагріву $(1 + d)$ кг вологого повітря від 0°C до поточної температури. Для інженерних розрахунків використовується формула:

					КРБ.142.4257см.01.05.ПЗ.02	Арк.
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		21

$$h = 1,006 \cdot t + d \cdot (2501 + 1,86 \cdot t)$$

де t – температура повітря, ° С;

d – вологовміст повітря, г / кг.

Атмосферне повітря являє собою суміш сухого повітря, водяної пари та ін.

Для теплотехнічних розрахунків атмосферне повітря розглядається як суміш сухого повітря ($N_2 \approx 79\%$, $O_2 \approx 21\%$) та водяної пари. Водяна пара становить від 0,2 до 2,6% за об'ємом. Атмосферне повітря в природних умовах завжди є вологим повітрям. Вологе повітря може бути насиченим і ненасиченим.

Оскільки судно має необмежений район плавання, розрахунок теплоприпливів та підбір обладнання СХУ проводиться для умов роботи в тропічній зоні. Це забезпечує необхідний запас холодопродуктивності при переході через екваторіальні широти.

При проєктуванні необхідно враховувати додаткові джерела навантаження на систему, а саме:

- розташування (приміщення, що межують з відкритими палубами (сонячна радіація) або машинним відділенням (теплопередача через перебірки);
- джерела вологи (кількість людей у приміщенні, наявність харчоблоків або душових);
- газовиділення (концентрація CO_2 та специфічних суднових запахів, що визначає норму подачі свіжого повітря, зазвичай не менше 20–30 м³/год на людину).

Так, в розрахунках для необмеженого району плавання рекомендується приймати такі значення температури і відносної вологості зовнішнього повітря:

Літній режим (Тропічне плавання): температура повітря 35 °С, відносна вологість повітря 70%, температура забортної води 32 °С.

					КРБ.142.4257ст.01.05.ПЗ.02	Арк.
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		22

Зимовий режим (Арктичне/Антарктичне плавання): температура повітря -25°C , відносна вологість повітря 85%, температура забортної води 0°C .

2.2. Вибір ізоляційних конструкцій огорож приміщення, що охолоджуються.

Вибір та розрахунок теплової ізоляції є одним із найвідповідальніших етапів проєктування суднової холодильної установки (СХУ). Якісна ізоляція дозволяє мінімізувати теплоприпливи в камери, що, своєю чергою, зменшує необхідну потужність компресорного агрегату, знижує енерговитрати судна та забезпечує стабільність температурного режиму при збоях у роботі обладнання.

Враховуючи умови експлуатації судна «SIDER KING» (необмежений район плавання, тропічні умови), до ізоляційних конструкцій висуваються підвищені вимоги щодо вологостійкості, вогнестійкості та низької теплопровідності.

Для даного проєкту обрано пінополіуретан (PUR) у вигляді сендвіч-панелей. Вибір обґрунтований наступними характеристиками матеріалу:

- Низький коефіцієнт теплопровідності. $\lambda = 0,022 \dots 0,025 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$, що дозволяє зменшити товщину огорож та збільшити корисний об'єм комор.
- Гігроскопічність. Завдяки закритій пористій структурі пінополіуретан практично не поглинає вологу, що є критичним для суднових умов.
- Гігієнічність. Облицювання панелей виконується з оцинкованої сталі з полімерним покриттям («харчовий» стандарт), що дозволяє проводити регулярну санітарну обробку.

Конструкція огорож комор судна «SIDER KING» передбачає використання модульних сендвіч-панелей, що кріпляться до сталевого набору

					<i>КРБ.142.4257см.01.05.ПЗ.02</i>	Арк.
						23
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

корпусу (бічних перебірок, палуб та підволок). Для уникнення «містків холоду» використовується спеціальна замкова система «шип-паз» з додатковою герметизацією стиків силіконовими ущільнювачами.

Відповідно до розрахункових температурних перепадів Δt , обрано наступні товщини ізоляції:

Для камери м'яса та риби ($t_k = -20^\circ\text{C}$) товщина панелей становить 150 мм. Це забезпечує надійний термічний опір при зовнішній температурі $+35^\circ\text{C}$.

Для середньотемпературних камер ($t_k = +2 \dots +4^\circ\text{C}$) товщина панелей та внутрішніх перегородок між камерами становить 100 мм.

Для палуби (підлоги) використовується посилена ізоляція товщиною 150 мм з додатковим шаром вологостійкої фанери та антиковзаючим алюмінієвим покриттям, розрахованим на навантаження від стелажів та переміщення персоналу.

Фізичні параметри конструкції

Для подальших теплотехнічних розрахунків прийнято наступні теплофізичні характеристики матеріалів (табл. 2.1).

Таблиця 2.1. Характеристики матеріалів ізоляційної конструкції.

Матеріал шару	Товщина δ , м	Теплопровідність λ , Вт/(м·К)
Сталева перебірка (корпус)	0,008	58,0
Повітряний прошарок	0,020	0,026
Пінополіуретан	0,10 / 0,15	0,024
Сталеве облицювання (панель)	0,0006	50,0

Коефіцієнт теплопередачі k [Вт/(м²·К)] для багатошарової стінки розраховується за формулою:

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{\text{зовн}}} + \sum \frac{\delta_{i3}}{\lambda_{i3}} + \frac{1}{\alpha_{\text{вн}}}}$$

Розрахунок теплової ізоляції приводиться до визначення коефіцієнту теплопередачі. Для елементів приміщення, дотичних до набору корпусу (стеля, передня та задня стінка). Обираємо нормальну конструкцію ізоляції: перекриваючий набір з перпендикулярним розташуванням брусків набору (рис.2.1).

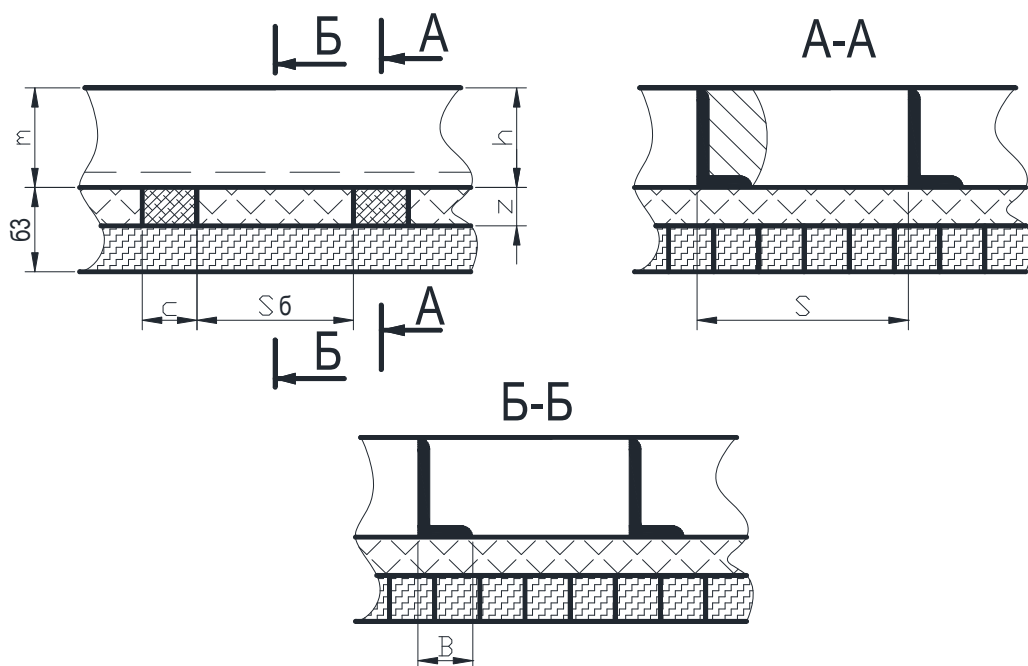


Рис 2.1. Перекриваючий набір з перпендикулярним розташуванням брусків набору

Розрахунок для шарів стінки (камера м'яса).

- Зовнішня сталева обшивка (корпус/панель): $\delta_1 = 6 \text{ мм (0,0006 м)}$; $\lambda_1 = 50 \text{ Вт/(м·К)}$ (сталь). Опір ≈ 0 .
- Основна ізоляція (PUR): $\delta_2 = 150 \text{ мм (0,15 м)}$; $\lambda_2 = 0,024 \text{ Вт/(м·К)}$.
- Внутрішня обшивка панелі: $\delta_3 = 6 \text{ мм (0,0006 м)}$; $\lambda_3 = 50 \text{ Вт/(м·К)}$. Опір ≈ 0 .

Розрахунок для різних елементів огорожі:

Для суднових умов приймаємо стандартні значення коефіцієнтів тепловіддачі:

- Коефіцієнт тепловіддачі зовні (повітря): $\alpha_{\text{зовн}} = 23 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$.
- Коефіцієнт тепловіддачі всередині (внутрішні приміщення судна, коридори): $\alpha_{\text{вн}} = 10 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$.
- Коефіцієнт тепловіддачі всередині (всередині камери з примусовим рухом повітря від повітроохолоджувачів): $\alpha_{\text{вн}} = 9 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$.

1. Зовнішні стінки (що виходять на відкриту палубу або борт)

$$k_{\text{з.с.}} = \frac{1}{\frac{1}{23} + \frac{0,15}{0,024} + \frac{1}{9}} = 0,1 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$$

2. Внутрішні перебірки (суміжні з коридорами або надбудовою)

$$k_{\text{в.с.}} = \frac{1}{\frac{1}{10} + \frac{0,15}{0,024} + \frac{1}{9}} = 0,155 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$$

3. Палуба (підлога камери м'яса)

Враховуючи посилену конструкцію підлоги (фанера, алюміній) та меншу інтенсивність руху повітря знизу:

$$k_{\text{підл.}} = \frac{1}{\frac{1}{12} + \frac{0,15}{0,024} + \frac{1}{7}} = 0,154 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$$

4. Підволок (стеля камери)

$$k_{\text{підв.}} = \frac{1}{\frac{1}{10} + \frac{0,15}{0,024} + \frac{1}{8}} = 0,154 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$$

5. Перегородка між камерою м'яса та камерою овочів

Зовнішньою температурою є температура в камері овочів ($t = +2 \text{ }^\circ\text{C}$).

$$k_{\text{пер.}} = \frac{1}{\frac{1}{9} + \frac{0,15}{0,024} + \frac{1}{9}} = 0,154 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$$

					КРБ.142.4257ст.01.05.ПЗ.02	Арк.
						26
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

В таблиці 2.2 зведено основні розрахункові значення для елементів огороження трюма.

Таблиця 2.2. Розрахункові значення для елементів трюма.

Елемент огороження	Площа F , м ²	Товщина δ , мм	Коефіцієнт k , Вт/(м ² ·К)
Зовнішня стінка (бортова перебірка)	10	150	0,156
Внутрішня стінка (суміжна з коридором)	10	150	0,155
Поперечна перебірка (суміжна з тамбуром)	6,25	150	0,155
Перегородка (суміжна з камерою овочів)	6,25	150	0,154
Палуба (підлога камери)	10	150	0,154
Підволок (стеля камери)	10	150	0,154
Разом	52,5	—	—

2.3. Визначення сумарного теплопритоку і холодопродуктивності СХУ.

Розрахунок сумарного теплового навантаження на суднову холодильну установку є основою для визначення її необхідної холодопродуктивності та подальшого підбору компресорного й теплообмінного обладнання. Сумарний теплопритік до охолоджуваних камер провізійних комор складається з кількох компонентів і визначається за формулою:

$$Q_{\Sigma} = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 + Q_5$$

де:

Q_1 – теплоприпливи через зовнішні та внутрішні огороження камер;

					КРБ.142.4257см.01.05.ПЗ.02	Арк.
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		27

Q_2 – теплоприпливи від термічної обробки та дихання продуктів при їх завантаженні й зберіганні;

Q_3 – теплоприпливи з корисним вентиляційним повітрям (у суднових провізійних коморах зазвичай розраховуються у складі експлуатаційних витрат або мінімізуються завдяки тамбуру);

Q_4 – експлуатаційні теплоприпливи (від роботи вентиляторів повітроохолоджувачів, освітлення, перебування людей, відкривання дверей);

Q_5 – теплоприпливи за рахунок виділення вологи та обмерзання (часто враховуються коефіцієнтом запасу).

Проведемо детальний розрахунок основних складових для камери м'яса та риби ($V = 25 \text{ м}^3$, $t_k = -20^\circ\text{C}$) судна «SIDER KING».

Розрахунок теплоприпливів через огородження (Q_1).

Теплоприпливи через елементи конструкції комори визначаються для кожного огородження окремо за формулою:

$$Q_1 = k \cdot F (t_{\text{зовн}} - t_{\text{тр}}) \cdot \psi$$

де:

k – коефіцієнт теплопередачі елемента огородження, Вт/(м²·К) (взяті з Таблиці 2.2);

F – площа огородження, м²;

$t_{\text{зовн}}$ – температура середовища з боку, протилежного камері, °С;

t_k – температура всередині камери (-20°С);

ψ – коефіцієнт, що враховує сонячну радіацію (для зовнішніх стінок, які піддаються інсоляції, приймаємо $\psi = 1,1 \dots 1,2$; для внутрішніх перебірок $\psi = 1,0$).

					КРБ.142.4257ст.01.05.ПЗ.02	Арк.
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		28

Таблиця 2.3. Розрахункові значення для елементів трюма.

	$F, \text{ м}^2$	$k, \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$	$t_{\text{зовн}}, ^\circ\text{С}$	$t_{\text{вн}}, ^\circ\text{С}$	$Q_1, \text{ Вт}$
Зовнішня стінка (борт)	10	0,156	35	-20	98,7
Внутрішня стінка (коридор)	10	0,155	30	-20	77,5
Поперечна перебірка (тамбур)	6,25	0,155	12	-20	31,0
Перегородка (камера овочів)	6,25	0,154	2	-20	21,2
Палуба (підлога)	10	0,154	30	-20	77,0
Підволок (стеля):	10	0,154	35	-20	93,2
Разом	112				398,6

$$Q_{\Sigma} = 0,399 \text{ кВт}$$

Розрахунок теплоприпливів від продуктів (Q_2).

Теплоприкток від теплової обробки вантажу виникає під час режиму завантаження провізії, коли на борт постачаються продукти з вищою температурою, ніж температура зберігання. Розрахунок ведеться за формулою:

$$Q_2 = \frac{m \cdot c (t_{\text{поч}} - t_{\text{кін}})}{\tau \cdot 3600}$$

де:

m – маса продукту, що завантажується щодня (приймаємо за судновими нормами 10% від загального запасу камери м'яса для екіпажу на автономний рейс, орієнтовно $m = 120 \text{ кг/добу}$);

c – питома теплоємність м'яса/риби в замороженому стані ($c \approx 1,8 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$);

$t_{\text{поч}}$ – початкова температура продуктів, що постачаються на борт (для заморожених продуктів приймається біля $-10 ^\circ\text{С}$);

τ – тривалість інтенсивного охолодження протягом доби ($\tau = 24 \text{ год}$).

					КРБ.142.4257см.01.05.ПЗ.02	Арк.
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		29

$$Q_2 = \frac{120 \cdot 1800(-10 - (-20))}{24 \cdot 3600} = 25 \text{ Вт}$$

Розрахунок експлуатаційних та інших теплоприпливів (Q_{in}).

Цей блок враховує внутрішні джерела виділення теплоти:

1. Від штучного освітлення ($Q_{осв}$):

У розрахунку на площу палуби камери (10м^2) за використання вологозахищених світлодіодних суднових світильників питома потужність становить $q = 3 \text{ Вт/м}^2$.

$$Q_{осв} = 10 \cdot q = 10 \cdot 3 = 30 \text{ Вт}$$

2. Від електродвигунів повітроохолоджувачів ($Q_{дв}$):

Потужність вентилятора для камери такого об'єму становить біля 80 Вт.

3. Від перебування людей ($Q_{л}$):

Тепловіддача від однієї людини при виконанні важкої роботи за низьких температур становить $q_{л} \approx 260 \text{ Вт}$. Враховуючи коефіцієнт перебування (робота кока або дневального в камері триває сумарно не більше 1 години на добу, тобто коефіцієнт $1/24 \approx 0,042$):

$$Q_{л} = 1 \cdot 260 \cdot 0,042 = 10,9 \text{ Вт}$$

4. Від відкривання дверей та інфільтрації повітря ($Q_{дв}$):

Для камер із тамбуром приймається орієнтовно 10–15% від Q_1 .

Загальний тепловий баланс.

Сумарне теплове навантаження на один трюм:

$$Q_{\Sigma} = 399 + 25 + 168 = 592 \text{ Вт}$$

Необхідна проєктна холодопродуктивність компресора з урахуванням коефіцієнта запасу ($k_z = 1,2$). Необхідна проєктна холодопродуктивність установки для даної камери з урахуванням середньодобового коефіцієнта робочого часу компресора ($\beta = 0,75 \dots 0,85$, тобто компресор працює 18–20 годин на добу) становить:

					КРБ.142.4257см.01.05.ПЗ.02	Арк.
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		30

$$Q_p = \frac{1,2 \cdot 592}{0,8} = 889 \text{ Вт}$$

Далі проведено розрахунок теплоприпливів для решти приміщень комплексу рефрижерації за аналогічною методикою та зведемо всі дані в підсумкову таблицю.

Для розрахунку суміжних камер було враховано:

1. Камера овочів та фруктів ($V = 20 \text{ м}^3$, $t_k = 2^\circ\text{C}$): тут суттєву роль відіграє теплота біологічного дихання плодів, що збільшує значення Q_2 , але менший температурний напір Δt знижує Q_1 .
2. Молочна камера / суха провізія ($V = 15 \text{ м}^3$, $t_k = 4^\circ\text{C}$): розрахована на менші об'єми щоденного обігу, має найменші теплоприпливи через огорожі.
3. Вестибюль ($V = 10 \text{ м}^3$, $t_k = 12^\circ\text{C}$): розраховується лише на теплоприпливи через зовнішні огороження та інфільтрацію, оскільки продукти в ньому не зберігаються.

Нижче наведена підсумкова зведена таблиця теплоприпливів та необхідної холодопродуктивності для СХУ судна «SIDER KING».

Таблиця 2.4. Зведена таблиця теплоприпливів комплексу провізійних комор, Вт

Найменування камери	Теплоприпливи через огороження, Q_1	Теплоприпливи від продуктів, Q_2	Експлуатаційні теплоприпливи, $Q_{\text{ін}}$	Сумарний теплопритік, Q_{Σ}	Необхідна холодопродуктивність, Q_0 ($\beta=1,2$; $b=0,8$)
Камера м'яса та риби	398,6	25,0	168,7	592,3	889
Камера овочів та фруктів	225,4	145,0	142,0	512,4	768,6
Молочна / суха провізія	158,2	40,0	115,5	313,7	470,6

Вестибюль (тамбур)	112,0	—	65,0	177,0	265,5
УСЬОГО	894,2	210,0	491,2	1595,4	2393,5

2.4. Вибір системи охолодження та холодильного агенту.

Для суднових провізійних комор традиційно розглядають дві основні системи охолодження: безпосереднє випаровування (пряме охолодження) та непряме (за допомогою проміжного холодоносія – розсолу або гліколю).

Для комплексу провізійних комор суховантажного судна «SIDER KING» обрано систему безпосереднього охолодження (Direct Expansion – DX) з примусовим рухом повітря через повітроохолоджувачі. Цей вибір обґрунтований наступними факторами:

1. Компактність та мала маса: Холодильний агент випаровується безпосередньо в батареях камер, що виключає потребу в проміжних теплообмінниках (випарниках розсолу), циркуляційних насосах та баках. Це критично для обмеженого простору суднової надбудови.

2. Енергетична ефективність: Температура кипіння холодоагенту при прямому охолодженні на 4...5 °С вища, ніж у системах із проміжним холодоносієм для досягнення тієї ж температури в камері. Це суттєво знижує питому роботу стиснення в компресорі та зменшує енергоспоживання.

3. Швидкість реагування: Система має низьку теплову інерційність, що дозволяє швидко компенсувати теплоприпливи при інтенсивному завантаженні провізії або частому відкриванні дверей екіпажем.

Для циркуляції повітря в камерах передбачено встановлення компактних підвісних повітроохолоджувачів із вбудованими вентиляторами, що гарантує рівномірне температурне поле по всьому об'єму комор.

Обґрунтування та вибір холодильного агенту

Вибір робочої речовини для СХУ судна «SIDER KING» базується на компромісі між термодинамічною ефективністю, безпекою експлуатації та суворими екологічними вимогами Міжнародної морської організації (ІМО), Конвенції МАРПОЛ (Додаток VI) та сучасних європейських регламентів (F-Gas Regulation).

У проєкті розглянуто два базові варіанти: R404A та R448A. Попри те, що R404A тривалий час був стандартом для суден іноземної побудови (зокрема серій 2010–2015 рр.), його високий потенціал глобального потепління ($GWP = 3922$) обмежує його використання в сучасних умовах. Як прогресивну альтернативу в проєкті прийнято озонобезпечну суміш R448A ($GWP = 1387$), що є сумісною з обладнанням для R404A, але зменшує екологічний податок на судно майже у 3 рази.

Основні порівняльні характеристики холодоагентів наведені в таблиці 2.5.

Таблиця 2.5. Порівняльний аналіз судових холодоагентів

Показник	R404A	R448A	Примітки / Вимоги безпеки
Озоноруйнівна здатність (ODP)	0	0	Повністю озонобезпечні
Потенціал глобального потепління (GWP)	3922	1387	R448A відповідає вимогам обмежень після 2025–2026 рр.
Група безпеки (ASHRAE)	A1	A1	Токсичність відсутня, не горючі в умовах експлуатації
Критична температура, °C	72,1	83,7	Достатня для роботи при конденсації в тропіках ($t_k = 40...45^{\circ}\text{C}$)
Температурний глайд, K	0,7	4,3	R448A має температурне ковзання, що враховується при розрахунку

Для проєкту СХУ судна «SIDER KING» приймається система безпосереднього охолодження із використанням холодоагенту R448A (або R404A як базового прототипу для порівняння), що забезпечує виконання вимог безпеки (клас A1), екологічності та дозволяє використовувати стандартну лінійну автоматику і компресори провідних європейських брендів (наприклад, Danfoss, Bitzer).

2.5. Висновки за розділом 2.

У другому розділі було виконано комплекс теплотехнічних розрахунків та обґрунтовано основні проєктні рішення для комплексу рефрижерації судна «SIDER KING»:

1. Відповідно до вимог класифікаційних товариств для необмеженого району плавання, розрахунки виконано для тропічних умов (повітря +35 °С, забортна вода +32 °С). У коморах встановлено три температурні режими: -20 °С (м'ясо/риба), +2 °С (овочі/фрукти), +4 °С (молочна/суха провізія) та +12 °С (вестибюль).

2. Застосовано сендвіч-панелі з пінополіуретану (PUR) товщиною 100 та 150 мм у сталевому облицюванні. Розраховані коефіцієнти теплопередачі становлять $k \approx 0,154 \dots 0,156$ Вт/(м²·К), що мінімізує трансмісійні втрати холоду.

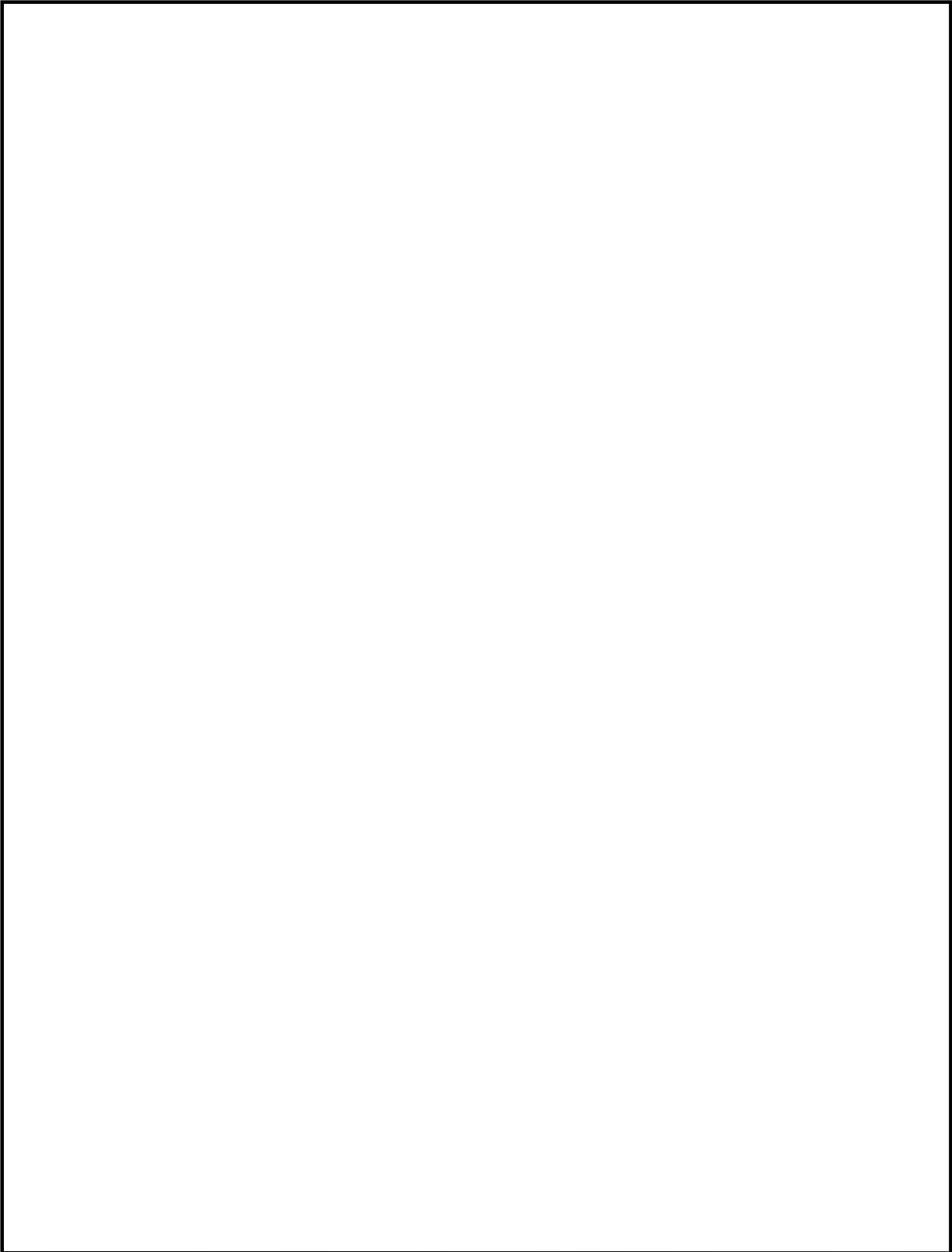
3. Проведено покомпонентний розрахунок теплоприпливів від зовнішніх огорожень ($Q_1 = 894,2$ Вт), термічної обробки продуктів ($Q_2 = 210,0$ Вт) та експлуатаційних витрат ($Q_{in} = 491,2$ Вт). Сумарний теплопритік до комплексу комор становить $Q_{\Sigma} = 1595,4$ Вт.

4. З урахуванням коефіцієнта запасу та часу роботи компресора, загальна необхідна холодопродуктивність установки становить $Q_0 = 2393,2$ Вт.

					КРБ.142.4257см.01.05.ПЗ.02	Арк.
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		34

5. Обрано систему безпосереднього охолодження (Direct Expansion) з примусовим рухом повітря через підвісні повітроохолоджувачі. Як робоче тіло прийнято екологічний та озонобезпечний холодоагент R448A ($GWP = 1387$).

					КРБ.142.4257см.01.05.ПЗ.02	Арк.
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		35



					КРБ.142.4257см.01.05.ПЗ.03						
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	Розділ 3				Літ.	Арк.	Аркушів
Студент		Дроченко А.В.									
Керівник		Радченко Р.М.									
Консульт.											
Зав.каф.		Кобалава Г.О.			ХННІ НУК						
					36						

РОЗДІЛ 3. ПРОЄКТУВАННЯ ХОЛОДИЛЬНОЇ МАШИНИ

3.1. Побудова циклу холодильної машини на p, h -діаграмі та його розрахунок.

Для забезпечення необхідних низькотемпературних та середньотемпературних режимів у провізійних коморах судна «SIDER KING» застосовано парокомпресійну холодильну машину (ПКХМ). Принцип роботи такої машини базується на термодинамічному циклі фазового переходу робочої речовини (кипіння та конденсація), що супроводжується поглинанням теплоти з охолоджуваного контуру та її відведенням у навколишнє середовище. Аналіз та розрахунок реального експлуатаційного циклу ПКХМ виконується шляхом його графічного моделювання на діаграмі стану холодоагенту в координатах «абсолютний тиск – ентальпія» ($p-h$ -діаграмі). Це дозволяє наочно відобразити процеси стиснення, конденсації, дроселювання та випаровування, а також визначити ключові термодинамічні параметри у вузлових точках системи, що є необхідним для розрахунку питомих характеристик установки.

Принципова схема ПКХМ зображена на рис.3.1

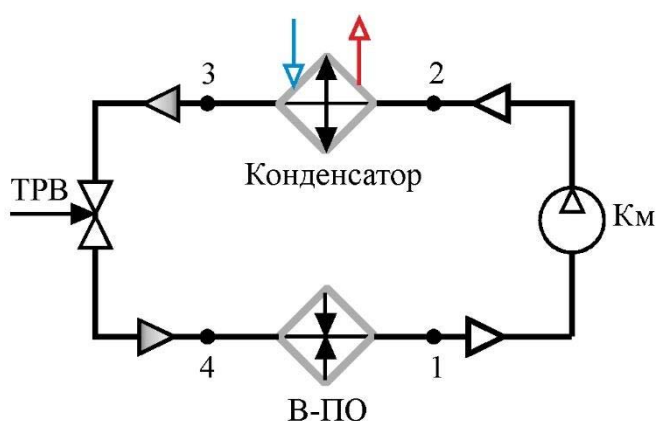


Рис. 3.1 Принципова схема парокомпресорної холодильної машини. K_m – компресор K_n – конденсатор; ТРВ – терморегулюючий вентиль; В-ПО – випарник-повітроохолоджувач.

У системі безпосереднього охолодження із сухими повітроохолоджувачами для камери м'яса та риби ($t_k = -20^\circ\text{C}$) приймаємо такі вихідні параметри для побудови циклу:

– Температура кипіння, приймається на 10°C нижче за температуру в камері м'яса: $t_0 = -20 - 10 = -30^\circ\text{C}$.

– Температура конденсації, при охолодженні конденсатора заборотною водою з температурою $+32^\circ\text{C}$ температура конденсації приймається на 8°C вищою: $t_k = 32 + 8 = 40^\circ\text{C}$.

– Перегрів пари в повітроохолоджувачі та всмоктувальному трубопроводі: $\Delta t_{\text{пер}} = 5^\circ\text{C}$.

– Переохолодження рідкого холодоагенту в конденсаторі: $\Delta t_{\text{по}} = 3^\circ\text{C}$.

Визначення параметрів вузлових точок циклу.

На основі термодинамічних таблиць R448A та p-h діаграми визначимо основні параметри (тиск P , температура t , ентальпія h , питомий об'єм v):

Таблиця 3.1. Термодинамічні параметри точок циклу.

Точка	Опис стану	P , бар	t , $^\circ\text{C}$	h , кДж/кг	s , кДж/(кг·К)	v , м ³ /кг
1	Всмоктування (перегріта пара)	2,1	-25	365,0	1,76	0,095
2	Нагнітання (ізоентропне стиснення)	18,3	+82	425,0	1,76	0,012
3	Перед дроселем (рідина)	18,3	+37	255,0	1,18	0,0009
4	Вхід у випарник (суміш)	2,1	-30	255,0	1,22	0,028

На основі параметрів точок циклу (табл. 3.1) визначимо основні питомі теплові та енергетичні показники роботи одноступеневої ПКХМ:

Питомі характеристики холодильного циклу

					КРБ.142.4257см.01.05.ПЗ.03	Арк.
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		38

Питома холодопродуктивність, кДж/кг

Кількість теплоти, яку поглинає 1 кг холодоагенту під час кипіння у повітроохолоджувачі.

$$q_0 = h_1 - h_4 = 365 - 255 = 110 \text{ кДж/кг}$$

Питома робота стиснення в компресорі (l_k):

$$l_k = h_2 - h_1 = 425 - 365 = 60 \text{ кДж/кг}$$

Питоме теплове навантаження на конденсатор (q_k):

$$q_k = h_2 - h_3 = 425 - 225 = 170 \text{ кДж/кг}$$

Холодильний коефіцієнт циклу (ε):

$$\varepsilon = \frac{q_0}{l_k} = \frac{110}{60} = 1,83$$

Розрахунок питомих характеристик одноступеневої ПКХМ на холодоагенті R448A підтвердив термодинамічну ефективність обраного циклу в умовах тропічної експлуатації судна «SIDER KING». Отримане значення холодильного коефіцієнта $\varepsilon = 1,83$ є оптимальним для низькотемпературних суднових установок прямого охолодження, що працюють за значного температурного напору між кипінням (-30°C) та конденсацією ($+40^\circ\text{C}$). Співвідношення питомої холодопродуктивності та роботи стиснення свідчить про помірне енергетичне навантаження на майбутній компресорний агрегат, що дозволить мінімізувати витрату палива на суднове дизель-генераторне обладнання.

3.2. Підбір холодильного компресора, теплообмінних апаратів та іншого устаткування холодильної установки.

Компресор є головним та найбільш енергоємним елементом парокомпресорної холодильної машини. Його основне призначення полягає у

					КРБ.142.4257см.01.05.ПЗ.03	Арк.
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		39

забезпеченні безперервного кругового циклу руху холодоагенту в системі. Компресор виконує дві критичні функції:

1. Відсмоктування пари холодоагенту з повітроохолоджувачів (випарників) камер, що дозволяє підтримувати в них заданий низький тиск кипіння (p_0) і, відповідно, низьку температуру.
2. Стиснення пари до тиску конденсації (p_k) та її нагнітання в конденсатор, де холодоагент може знову перетворитися на рідину, віддаючи теплоту забортній воді.

У суднових холодильних установках для провізійних комор найчастіше застосовуються герметичні або напівгерметичні поршневі компресори, оскільки вони мають високу надійність, ремонтпридатність в умовах рейсу та ефективно працюють за великих перепадів тиску ($\Delta p = p_k - p_0$).

Принципи та критерії підбору компресора для судна

Відповідність за розрахунковою холодопродуктивністю ($Q_{0\text{комп}}$): Компресор підбирається не за сумарним середньодобовим теплопритоком (Q_Σ), а за секундним навантаженням з урахуванням регламентованого часу його роботи протягом доби ($b = 0,8$, тобто 19,2 години роботи).

Режим експлуатації (робоча точка): Підбір здійснюється строго для конкретних параметрів термодинамічного циклу: температури кипіння $t_0 = -30$ °C та температури конденсації $t_k = +40$ °C на холодоагенті R448A.

Енергетична ефективність (коефіцієнт COP): Перевага віддається моделям із вищим холодильним коефіцієнтом для зменшення навантаження на суднове електрообладнання.

Конструктивні обмеження: На суднах важливими є стійкість до вібрацій, нахилів (крен і диферент), компактність та можливість плавного або східчастого регулювання потужності в зимовий період плавання, коли теплоприпливи суттєво зменшуються.

					КРБ.142.4257см.01.05.ПЗ.03	Арк.
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		40

Розрахунок масової та об'ємної витрати холодоагенту

Для того щоб підібрати конкретну модель компресора, необхідно визначити кількість холодоагенту, яку він повинен перекачувати щосекунди.

Масова витрата холодоагенту (G_m , кг/с):

$$G_m = \frac{Q_0}{q_0} = \frac{2,4}{110} \approx 0,0218 \text{ кг/с}$$

Теоретична об'ємна витрата холодоагенту на всмоктуванні (V_s , м³/год):

$$V_s = G_m \cdot 3600 \cdot v_1 = 0,0218 \cdot 3600 \cdot 0,095 \approx 7,44 \text{ м}^3/\text{год}$$

Дійсна об'ємна витрата (необхідна об'ємна продуктивність компресора) (V_h , м³/год). Враховує об'ємні втрати в компресорі (недорозширення в мертвому просторі, підігрів пари, витоки) через коефіцієнт подачі $\lambda_n=0,62$.

$$V_h = \frac{V_s}{\lambda_n} = \frac{7,44}{0,62} \approx 12 \text{ м}^3/\text{год}$$

На основі розрахункової об'ємної витрати пари холодоагенту та умови роботи в тропіках на холодоагенті R448A за допомогою програмного комплексу Bitzer Software було обрано напівгерметичний поршневий компресор **Bitzer 2CES-3Y** (серія Ecoline).

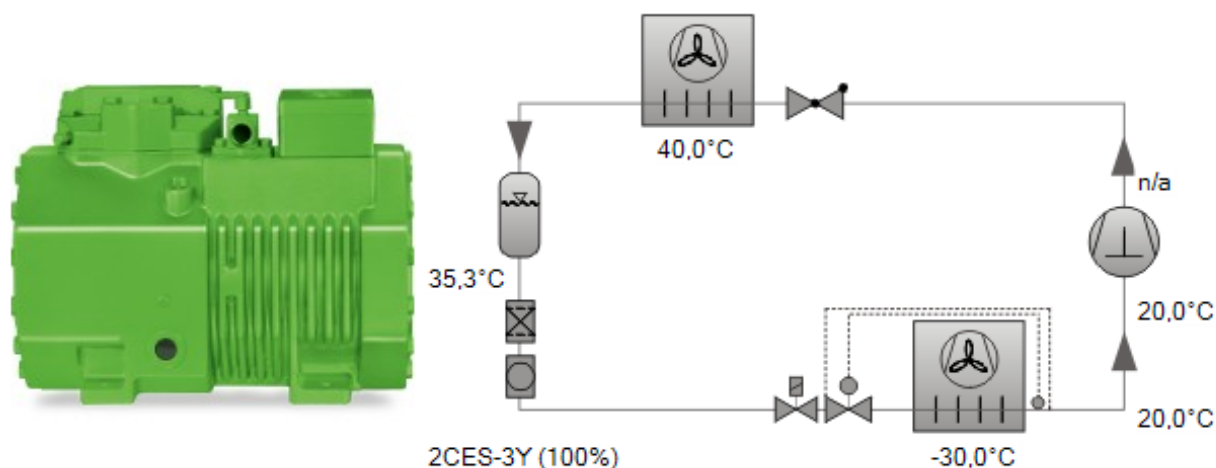


Рис. 3.2. Загальний вигляд напівгерметичного поршневого компресора Bitzer 2CES-3Y (серія Ecoline) [6]

Основні технічні характеристики компресора Bitzer 2CES-3Y:

- Кількість циліндрів: 2 шт.
- Холодоагент: R448A
- Об'ємна продуктивність: V_h : 16,24 м³/год.
- Діаметр циліндра / хід поршня: 55/39,3 мм.
- Дійсна холодопродуктивність: 3,12 кВт.
- Максимальний робочий струм: 9,1 А.
- Максимальна споживана потужність: 5,0 кВт.
- Тип мастила: синтетичне поліефірне BSE32 (Standard).
- Маса агрегату: 70 кг.

Перевірочний розрахунок та визначення ефективності компресора

Визначення коефіцієнта подачі (λ):

Проведемо аналіз ефективності роботи компресора за частоти 50 Гц у розрахунковій точці циклу ($t_0 = -30\text{ }^{\circ}\text{C}$, $t_k = +40\text{ }^{\circ}\text{C}$):

Дійсний коефіцієнт подачі (об'ємна ефективність) λ_n :

$$\lambda_n = \frac{V_s}{V_{h.p}} = \frac{7,44}{16,24} = 0,46$$

Значення $\lambda_n = 0,46$ є стандартним і цілком прийнятним для низькотемпературних поршневих компресорів, що працюють із високим відношенням тисків.

Ефективний холодильний коефіцієнт системи (COP).

Визначає енергетичний ККД компресора. Для даної робочої точки споживана потужність електродвигуна становить орієнтовно $P_{\text{еф}} = 1,7$ кВт:

$$COP = \frac{Q_{0.\text{комп}}}{P_{\text{еф}}} = \frac{3,12}{1,7} = 1,84$$

Поршневий компресор Bitzer 2CES-3Y за частоти 50 Гц забезпечує стабільну холодопродуктивність 3,12 кВт, що гарантує надійне підтримання температурних режимів у провізійних коморах «SIDER KING». Запас за

					КРБ.142.4257см.01.05.ПЗ.03	Арк.
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		42

об'ємною продуктивністю дозволить установці ефективно справлятися з піковими навантаженнями в режимі завантаження комор.

Розрахунок та вибір конденсатора

Конденсатор є одним із ключових теплообмінних апаратів холодильної установки. Його основна функція полягає у відведенні теплоти від високотемпературної перегрітої пари холодоагенту, яка надходить після компресора, та її повної конденсації за рахунок охолодження заборотною морською водою.

На судах типу «SIDER KING» до конденсаторів висуваються підвищені вимоги щодо корозійної стійкості, оскільки робочим середовищем є агресивна морська вода. У даному проєкті прийнято рішення використовувати кожухотрубний конденсатор морського виконання (умовне позначення "В" або "М" у Bitzer). У таких апаратах внутрішні трубки, по яких циркулює морська вода, виготовляються з мідно-нікелевого сплаву (CuNi), а кришки водяних порожнин захищені жертвними анодами, що забезпечує тривалий термін експлуатації та легкість механічного очищення від мулу й черепашок під час стоянкових ремонтів.

Для підбору теплообмінника необхідно визначити його розрахункове теплове навантаження (Q_k , Вт) та витрату охолоджувальної морської води (G_v , кг/с).

Визначення теплового навантаження конденсатора (Q_k):

$$Q_k = G_m \cdot q_k \cdot 10^3 = 0,0218 \cdot 170 \cdot 10^3 = 3698 \text{ Вт} = 3,7 \text{ кВт}$$

Розрахунок витрати охолоджувальної морської води (G_v):

Розрахунок ведеться для найбільш несприятливих умов плавання в тропіках.

Початкова температура заборотної води: $t_{b1} = 32^\circ\text{C}$.

Температуру води на виході з конденсатора приймаємо з урахуванням підігріву на $\Delta t_{\text{пер}} = 4^\circ\text{C}$: $t_{b2} = 36^\circ\text{C}$.

					КРБ.142.4257см.01.05.ПЗ.03	Арк.
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		43

Питома теплоємність морської води: $c_B = 4,1 \text{ кДж/(кг} \cdot \text{К)}$.

Масова витрата води визначається з рівняння теплового балансу:

$$G_B = \frac{Q_K}{c_B \cdot (t_{B2} - t_{B1}) \cdot 10^3} = 0,225 \text{ кг/с (0,81 м}^3\text{/кг)}$$

Технічний підбір кожухотрубного конденсатора Bitzer

На основі теплового навантаження (3,70 кВт) та робочого тиску хладагента R448A ($p_K = 18,3 \text{ бар}$) за заводським каталогом Bitzer підібрано кожухотрубний конденсатор морського виконання серії Bitzer K073H.



Рис. 3.3. Загальний вигляд кожухотрубного конденсатора морського виконання серії Bitzer K073H [6]

Технічні характеристики підбраного конденсатора Bitzer K073H.

Тип конструкції: Кожухотрубний теплообмінник.

Виконання: Морське (Seawater resistant, трубки CuNi 90/10).

Максимальна теплова потужність (за каталогом): 15,3 кВт (забезпечує чудовий запас для стабільної конденсації в тропіках).

Максимальний робочий тиск: 33 бар.

Витрата охолоджувальної води (номінальна): 0,85 м³/год.

Кожухотрубний конденсатор Bitzer K073HB повністю задовольняє інженерні вимоги проекту. Оскільки він має трубний пучок із мідно-нікелевого сплаву, він захищений від агресивної дії морської забортної води.

					КРБ.142.4257см.01.05.ПЗ.03	Арк.
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		44

Розрахунок та вибір повітроохолоджувачів

Повітроохолоджувачі (випарники) є кінцевими теплообмінними апаратами холодильної установки, які розміщуються безпосередньо всередині охолоджуваних камер. Їхня основна функція – відведення теплоти від повітряного середовища комори та передача її холодоагенту, який кипить усередині трубного пучка.

Для суднових провізійних комор судна «SIDER KING» обрано підвісні компактні повітроохолоджувачі з примусовим рухом повітря (осьовими вентиляторами). Примусова циркуляція забезпечує рівномірне температурне поле по всьому об'єму продуктів і прискорює процес охолодження при новому завантаженні.

З огляду на специфіку роботи в умовах високої вологості та низьких температур, повітроохолоджувачі повинні відповідати таким критеріям:

1. Наявність електричного відтавання (ТЕНів): через занесення вологи під час відкривання дверей на ребрах апаратів утворюється іній («снігова шуба»), який погіршує теплообмін і потребує регулярного плавлення.

2. Корозійна стійкість корпусу: ламелі та корпус зазвичай виготовляються з алюмінієвих сплавів або оцинкованої сталі з порошковим покриттям, стійким до агресивного морського середовища.

3. Крок ребра (ламелі): для низькотемпературних камер (м'ясо/риба) крок ребра має бути не менше 6–7 мм, щоб іній не блокував прохід повітря надто швидко. Для середньотемпературних камер достатньо 4–5 мм.

Розрахунок та підбір апаратів за камерами

Підбір повітроохолоджувачів здійснюється індивідуально для кожної камери за необхідною холодопродуктивністю (Q_0 , Вт) з урахуванням розрахункової різниці температур (температурного напору $\Delta t_n = 10$ °С).

Для підбору скористаємося інженерними специфікаціями та каталогами компанії виробника ECO Modine/Luvata (лінійка ECO).

					<i>КРБ.142.4257см.01.05.ПЗ.03</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		45

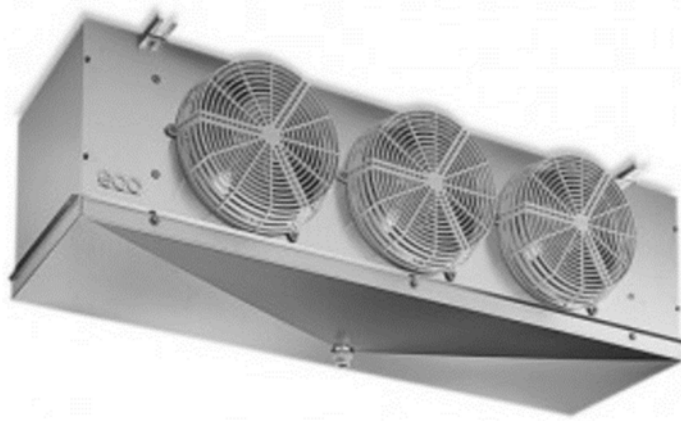


Рис. 3.4. Загальний вигляд повітроохолоджувача ECO STE [7]

1. Камера м'яса та риби ($Q_0 = 0,89$ кВт, $t_{\text{кам}} = -20$ °C, $t_0 = -30$ °C):

Обрано модель: ECO STE 38L7.

Технічні характеристики:

- Потужність: 0,95 кВт.
- Крок ребра: 7,0 мм (оптимально для заморожених продуктів).
- Площа поверхні теплообміну: 3,8 м².
- Продуктивність вентилятора: 560 м³/год.
- Потужність ТЕНів відтавання: 0,75 кВт.

2. Камера овочів та фруктів ($Q_0 = 0,77$ кВт, $t_{\text{кам}} = 2$ °C, $t_0 = -8$ °C):

Обрано модель: ECO STE 29M4.

Технічні характеристики:

- Потужність: 0,82 кВт.
- Крок ребра: 4,0 мм.
- Площа поверхні теплообміну: 4,4 м².
- Продуктивність вентилятора: 640 м³/год.
- Потужність ТЕНів відтавання: 0,60 кВт.

3. Молочна камера / суха провізія ($Q_0 = 0,47$ кВт, $t_{\text{кам}} = 4$ °C, $t_0 = -6$ °C):

Обрано модель: ECO STE 17M4.

Технічні характеристики:

- Потужність: 0,51 кВт.
- Крок ребра: 4,0 мм.

					КРБ.142.4257см.01.05.ПЗ.03	Арк.
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		46

- Площа поверхні теплообміну: 2,6 м².
- Продуктивність вентилятора: 380 м³/год.
- Потужність ТЕНів відтавання: 0,45 кВт.

Усі підібрані повітроохолоджувачі забезпечують стабільну циркуляцію повітря та мають необхідний запас потужності. Конструктивне виконання з вбудованою системою електровідтавання гарантує ефективну роботу СХУ без загрози критичного обмерзання трубних пучків в умовах тривалого рейсу судна «SIDER KING».

3.3. Розміщення обладнання холодильної установки у приміщенні.

Правильне розміщення обладнання суднової холодильної установки (СХУ) на суховантажному судні «SIDER KING» є критично важливим для забезпечення безпеки мореплавства, зручності технічного обслуговування, мінімізації довжини сполучних трубопроводів та дотримання вимог Регістру судноплавства України (а також ДСТУ EN 378-1).

Основне компресорно-конденсаторне обладнання СХУ провізійних комор проектується у вигляді єдиного компактного рамного агрегату (чилера/бокса), який розміщується в окремому виділеному вигородженому приміщенні – рефрижераторному відділенні (машинному відділенні холодильної установки), що зазвичай розташовується на одній з палуб суднової надбудови в безпосередній близькості до блоку провізійних камер (або безпосередньо у головному машинному відділенні, на спеціальній платформі).

При проектуванні розстановки обладнання враховані такі суворі правила:

1. Доступність для обслуговування: Навколо компресорно-конденсаторного агрегату передбачено вільні проходи завширшки не менше 0,7–0,8 м для проведення регламентних робіт, демонтажу поршневої групи

					КРБ.142.4257см.01.05.ПЗ.03	Арк.
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		47

компресора, чищення внутрішніх мідно-нікелевих трубок кожухотрубного конденсатора Bitzer K073H та ремонту лінійної автоматики.

2. Вентиляція та безпека: Приміщення обладнується автономною припливно-витяжною вентиляцією, що здатна забезпечити аварійне видалення повітря у разі витoku холодоагенту. Оскільки густина пари R448A вища за густину повітря, приймальні отвори витяжної вентиляції розташовуються у нижній зоні приміщення. Також на вході встановлюється стаціонарний сигналізатор витoku фреону.

3. Дренажні системи: Палуба рефрижераторного відділення виконується у вигляді герметичного піддона із бортиками та обладнується шпінгатами для зливу води в судновий піддон стічних вод (це необхідно на випадок розбирання водяних кришок конденсатора під час його сервісу).

Компоновка та кріплення елементів установки

Розміщення елементів СХУ виконується за блочно-модульним принципом:

Компресорно-конденсаторний агрегат. Компресор Bitzer 2CES-3Y та кожухотрубний конденсатор Bitzer K073HB (який одночасно виконує роль лінійного ресивера) змонтовані на спільній жорсткій сталевій зварній рамі.

Амортизація та компенсація нахилів. З огляду на роботу в умовах постійної судової вібрації від головного двигуна та дизель-генераторів, рама агрегату кріпиться до судового фундаменту через спеціальні судові резинометалеві віброізолятори (амортизатори типу АКСС). Для запобігання зламу труб від вібрації, всмоктувальний та нагнітальний трубопроводи компресора під'єднуються через гнучкі віброгасники (анаконди). Оливосистема компресора адаптована до тривалого крену судна до 15° та диференту до 5°.

Щит керування та автоматики. Електричний щит живлення та мікропроцесорний блок керування (на базі контролера Danfoss або Eliwell) встановлюється на перебірці рефрижераторного відділення на рівні очей

					КРБ.142.4257см.01.05.ПЗ.03	Арк.
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		48

оператора (1,6 м від палуби) у вологозахищеному виконанні (клас захисту не менше IP54).

Розміщення лінійної автоматики в камерах. Блоки терморегулювальних вентилів (ТРВ) разом із соленоїдними клапанами та фільтрами монтуються безпосередньо на вході трубопроводів у кожну камеру (у спеціальних захисних шафах на перебірках вестибюля), що спрощує візуальний контроль за налаштуванням перегріву. Повітроохолоджувачі ЕСО СТЕ надійно підвішуються до силового набору підволока (стелі) камер за допомогою шпильок крізь термоізоляційні втулки, щоб унеможливити утворення містків холоду.

3.4. Висновки за розділом 3.

У третьому розділі було виконано повний цикл проєктування холодильної машини для суховантажного судна «SIDER KING», що включав термодинамічні розрахунки, підбір основного обладнання та розробку схеми його розміщення.

1. На основі побудованого циклу на $p-h$ -діаграмі для холодоагенту R448A визначено питомі характеристики установки. Отриманий холодильний коефіцієнт $\varepsilon = 1,83$ підтверджує енергетичну ефективність обраного одноступеневого стиснення для тропічних умов експлуатації судна.

2. На основі розрахункової об'ємної витрати пари (7,44 м³/год) обрано напівгерметичний поршневий компресор Bitzer 2CES-3Y (50 Гц) з об'ємною продуктивністю 16,24 м³/год. Його дійсна холодопродуктивність (3,12 кВт) повністю перекриває потребу камер охолодження (2,39 кВт) і забезпечує необхідний експлуатаційний запас.

3. Підібрано кожухотрубний конденсатор морського виконання Bitzer K073H з трубками з мідно-нікелевого сплаву CuNi 90/10, який одночасно виконує роль лінійного ресивера. Для комор підібрано компактні

					КРБ.142.4257см.01.05.ПЗ.03	Арк.
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		49

підвісні повітроохолоджувачі серії ECO STE з вбудованими ТЕНами відтавання.

4. Визначено правила розміщення обладнання у рефрижераторному відділенні судна «SIDER KING». Передбачено використання суднових амортизаторів типу АКСС та гнучких віброгасників для компенсації вібрацій від головного двигуна та забезпечення працездатності установки при крені й диференті.

					КРБ.142.4257см.01.05.ПЗ.03	Арк.
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		50

					КРБ.142.4257см.01.05.ПЗ.04		
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	Розділ 4		
Студент		Дроченко А.В.					
Керівник		Радченко Р.М.					
Консульт.							
Зав.каф.		Кобалава Г.О.			ХННІ НУК 51		

РОЗДІЛ 4. АВТОМАТИЗАЦІЯ ТА СПЕЦИФІКАЦІЯ ОБЛАДНАННЯ СХУ

4.1. Підбір допоміжного обладнання та лінійної автоматики.

Для забезпечення безперебійної, безпечної та повністю автоматизованої роботи суднової холодильної установки «SIDER KING» у необмеженому районі плавання, компресорно-конденсаторний агрегат необхідно доукомплектувати допоміжним обладнанням та елементами лінійної автоматики. Підбір арматури виконано за каталогами компанії Danfoss за допомогою спеціалізованого інженерного програмного комплексу Coolselector 2, виходячи з розрахункових параметрів циклу на холодоагенті R448A.

Лінійний ресивер

У попередньому розділі було визначено, що як конденсатор обрано кожухотрубний апарат Bitzer K073HB, нижня частина кожуха якого має внутрішній об'єм 2,3 літра і конструктивно виконує роль лінійного ресивера. Цей об'єм є цілком достатнім для збору рідкого холодоагенту при відтаванні повітроохолоджувачів та згладжування коливань теплового навантаження. Додатковий окремий ресивер для даної установки малої потужності не потрібен, що спрощує схему та зменшує масу масогабаритних конструкцій на рамі.

Терморегулювальні вентилі (ТРВ)

ТРВ призначені для автоматичного дозування подачі рідкого холодоагенту у повітроохолоджувачі залежно від перегріву пари, що виходить з них. Для кожної з трьох камер підбирається індивідуальний механічний ТРВ із зовнішнім вирівнюванням тиску (серія Danfoss T2/TE2), що забезпечує стабільну роботу при суднових вібраціях.

Соленоїдні (електромагнітні) клапани

					КРБ.142.4257см.01.05.ПЗ.04	Арк.
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		52

Соленоїдні клапани встановлюються на рідинних лініях перед TRV кожної камери. Вони працюють у парі з двопозиційними термостатами камер і повністю перекривають подачу холодоагенту, коли в конкретній коморі досягнуто заданої температури.

Обрана модель для всіх трьох ліній: Danfoss EVR 3 (нормально закритий, сервоприводний або прямої дії, під паяння). Клапани комплектуються судовими вологозахищеними котушками змінного струму на напругу 220 В (50 Гц) з класом захисту IP67.

Фільтри-осушувачі

Фільтри-осушувачі встановлюються на загальній рідинній магістралі після конденсатора-ресивера (або безпосередньо перед блоком TRV кожної камери) для поглинання залишків вологи, кислот та механічних домішок із контуру, захищаючи прецизійні вузли автоматики від засмічення та «замерзання» води в дюзах.

Обрана модель: Фільтр-осушувач Danfoss DML 032s із твердим сердечником, що на 100% складається з молекулярного сита типу «3Å». Оптимальний для роботи з поліефірними оливами (POE) та сумішами HFO/HFC (R448A). Тип приєднання – під паяння (діаметр 1/4" / 6 мм).

Оглядове скло

Для візуального контролю ступеня заповнення рідинної лінії (наявності бульбашок пари перед TRV) та визначення рівня вологості в системі за кольорним індикатором, після фільтра-осушувача монтується оглядове скло.

Обрана модель: Danfoss SGP 6s N (під паяння, 6 мм), що розраховане на високий робочий тиск сучасних холодоагентів.

4.2. Система автоматичного захисту та контролю.

Для гарантування безпечної експлуатації СХУ в умовах тривалого автономного рейсу суховантажу «SIDER KING» передбачено комплексну систему автоматичного захисту, контролю та сигналізації. Вона мінімізує

					КРБ.142.4257см.01.05.ПЗ.04	Арк.
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		53

участь екіпажу в поточному обслуговуванні установки та захищає вартісне обладнання від аварійних режимів роботи.

Система захисту базується на автоматичних приладах прямої та опосередкованої дії, які знеструмлюють компресор у разі виходу робочих параметрів за гранично допустимі межі:

1. Захист за тиском нагнітання (високий тиск): Для запобігання руйнуванню елементів установки при припиненні подачі охолоджувальної морської води в конденсатор або утворенні повітряних пробок, на лінії нагнітання встановлюється пресостат високого тиску Danfoss KP 5 (або у складі здвоєного блоку KP 15). При досягненні тиску $p_k = 24$ бар (для R448A) компресор аварійно зупиняється. Цей захист має функцію ручного скидання, що вимагає від суднового інженера обов'язкового з'ясування причин аварії перед повторним пуском.

2. Захист за тиском всмоктування (низький тиск):

Здійснюється пресостатом низького тиску Danfoss KP 1. Він захищає випарну систему від вакуумування та запобігає потраплянню атмосферного повітря й вологи всередину контуру в разі значного витoku холодоагенту. Налаштування розраховане на вимкнення при падінні тиску до $p_0 = 1,2$ бар.

3. Захист від перегріву електродвигуна компресора:

Усередині обмоток напівгерметичного компресора Bitzer 2CES-3Y інтегровано термістори (PTC-датчики), підключені до електронного блоку захисту SE-B1. При підвищенні температури обмоток вище $105\text{ }^{\circ}\text{C}$ (через перевантаження або роботу на двох фазах) блок автоматично розриває ланцюг керування магнітного пускача.

4. Температурний контроль у камерах:

Здійснюється за допомогою електронних суднових термостатів або багатоканального мікропроцесорного контролера. Датчики температури (NTC/Pt100) фіксують поточні параметри у кожній камері та виводять дані на дисплей у рефрижераторному відділенні й на загальносуднову систему моніторингу (місток / ЦПУ). При виході температури за межі норми

					КРБ.142.4257см.01.05.ПЗ.04	Арк.
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		54

(наприклад, підвищення у камері м'яса вище -15°C) спрацьовує світлозвукова сигналізація.

4.3. Специфікація основного обладнання та засобів автоматизації.

У таблиці нижче зведено основні технічні одиниці, що були підібрані для забезпечення роботи холодильної установки судна «SIDER KING» ($Q_0 = 2,4 \text{ кВт}$, R448A).

Таблиця 4.1. Специфікація холодильної установки.

№ п/п	Найменування обладнання	Марка / Модель	Кількість
1	Поршневий напівгерметичний компресор	2CES-3Y (Ecoline)	1
2	Кожухотрубний конденсатор-ресивер	K073H	1
3	Повітроохолоджувач низькотемпературний	ECO CTE 38L7	1
4	Повітроохолоджувач середньотемпературний	ECO CTE 29M4	1
5	Повітроохолоджувач середньотемпературний	ECO CTE 17M4	1
6	Терморегулювальний вентиль (ТРВ)	TEX 2	1
7	Терморегулювальний вентиль (ТРВ)	TEX 2	1
8	Соленісний клапан	EVR 3 (з котушкою)	1
9	Фільтр-осушувач рідинний	DML 032s	1/1
10	Оглядове скло з індикатором волог	SGP 6s N	компл.
11	Віброгасник (анаконда) всмоктування	Danfoss / Castel	1
12	Віброгасник (анаконда) нагнітання	Danfoss / Castel	2

4.4. Висновки по розділу 4

У четвертому розділі розроблено систему автоматизації та сформовано підсумкову специфікацію обладнання СХУ:

1. За допомогою інженерного софту Coolselector 2 за каталогом Danfoss обрано елементи регулювання та очищення контуру. Для кожної камери підібрано терморегулювальні вентилі серії TEX 2 із зовнішнім

вирівнюванням тиску, соленоїдні клапани EVR 3, а також фільтр-осушувач DML 032s із молекулярним ситом для роботи з поліефірною оливою.

2. Передбачено надійну схему автоматичного захисту компресора від аварійних режимів: за високим тиском нагнітання (пресостат Danfoss KP 5 на 24 бар з ручним скиданням), за низьким тиском всмоктування (KP 1), а також захист обмоток двигуна від перегріву за допомогою інтегрованого модуля Bitzer SE-B1.

3. Реалізовано схему температурного моніторингу в камерах на базі судових електронних термостатів із виведенням аварійної світлозвукової сигналізації на центральний пульт керування (ЦПУ).

4. Усі підібрані основні та допоміжні елементи установки структуровано в підсумкову специфікацію обладнання, яка є технологічною базою для монтажу рефрижераторної установки провізійних комор судна.

					<i>КРБ.142.4257см.01.05.ПЗ.04</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		56

					КРБ.142.4257см.01.05.ПЗ.05			
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	Розділ 5	Літ.	Арк.	Аркушів
Студент		Дроченко А.В.						
Керівник		Радченко Р.М.						
Консульт.								
Зав.каф.		Кобалава Г.О.				ХННІ НУК		57

РОЗДІЛ 5. ОХОРОНА ПРАЦІ

5.1. Особливості технічної експлуатації СХУ на сумішах HFO/HFC (R448A).

Технічна експлуатація суднової холодильної установки «SIDER KING» на холодоагенті R448A вимагає від рефрижераторного екіпажу суворих регламентних дій, зумовлених фізико-хімічними властивостями цієї багатокомпонентної суміші та типом використовуваного мастила:

1. Оскільки R448A є зетропною сумішшю, він має температурне ковзання (глайд). Це означає, що за сталого тиску температури кипіння/конденсації змінюються. Налаштування TPV Danfoss TEX 2 та пресостатів мають здійснюватися строго за точками роси (Dew point) для всмоктування та точками кипіння (Bubble point) для рідинної лінії.

2. У разі виникнення витoku, заправлення установки дозволяється виконувати виключно в рідкій фазі з балона через заправний вентиль на рідинній магістралі (після конденсатора). Заправлення газом через всмоктувальний клапан компресора категорично заборонено, оскільки це призведе до зміни відсоткового компонентного складу суміші та втрати термодинамічної ефективності циклу.

3. Компресор Bitzer 2CES-3Y заправлений синтетичним мастилом BSE32, яке є надзвичайно гігроскопічним (інтенсивно поглинає вологу з повітря). Будь-які розгерметизації контуру для сервісних робіт мають виконуватися максимально швидко. Час контакту мастила з атмосферним повітрям не повинен перевищувати 15–20 хв, інакше мастило підлягає повній заміні через загрозу утворення кислот та омилення.

					КРБ.142.4257см.01.05.ПЗ.05	Арк.
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		58

5.2. Вимоги охорони праці та техніки безпеки при обслуговуванні установки.

При роботі із СХУ провізійних комор судновий персонал повинен керуватися вимогами міжнародного стандарту ISO 5149 (або ДСТУ EN 378), правил класифікаційних товариств та міжнародної конвенції SOLAS:

1. Холодоагент R448A належить до групи безпеки A1 (нешкідливий, не горючий). Проте, при потраплянні рідкого агента на шкіру людини під час сервісних робіт або перевірки фільтра Danfoss DML виникає миттєве термічне обмороження. Усі роботи з розгерметизації системи виконуються у захисних окулярах та кріогенних рукавицях.

2. Незважаючи на токсичну безпеку R448A, його великі витіки у закритому приміщенні можуть призвести до витіснення кисню і, як наслідок, до удушення екіпажу. У приміщенні рефрижераторного відділення судна обов'язково встановлюється датчик-сигналізатор концентрації фреону, заблокований з аварійною витяжною вентиляцією. Перед входом у приміщення після спрацювання сигналізації персонал зобов'язаний увімкнути вентиляцію на 10–15 хвилин або використовувати ізолювальні дихальні апарати.

3. Обслуговування щита керування та ТЕНів відтавання повітроохолоджувачів ЕСО СТЕ виконується тільки при повному знеструмленні відповідних ліній на головному розподільчому щиті (ГРЩ) із вивішуванням попереджувальних табличок «Не вмикати – працюють люди!». Обов'язковим є контроль цілісності контуру заземлення рами агрегату Bitzer.

5.3. Заходи з екологічної безпеки згідно з Конвенцією МАРПОЛ.

Екологічний аспект експлуатації СХУ судна «SIDER KING» регламентується Додатком VI до Міжнародної конвенції МАРПОЛ (Правила запобігання забрудненню атмосферного повітря з суден):

					КРБ.142.4257см.01.05.ПЗ.05	Арк.
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		59

На борту судна обов'язково ведеться «Журнал обліку речовин, що руйнують озоновий шар та сприяють глобальному потеплінню». У цей журнал судовий інженер заносить записи про кожну операцію заправлення, вилучення, регенерації або утилізації холодоагенту із зазначенням його точної маси.

Будь-які навмисні викиди R448A в атмосферу під час проведення ремонтних або сервісних робіт суворо заборонені. Для проведення капітального сервісу компресора або теплообмінників фреон має бути повністю відкачаний (евакуйований) у спеціальні сервісні балони за допомогою судової мобільної станції збору та регенерації холодоагенту.

Завдяки заміні застарілого судового фреону R404A на прогресивний сумішевий холодоагент R448A, показник потенціалу глобального потепління установки зменшено з 3922 до 1387 ($GWP < 1500$). Це повністю виводить судно «SIDER KING» з-під дії жорстких європейських штрафних екологічних санкцій (F-Gas Regulation) та дозволяє здійснювати безперешкодний захід у порти екологічних зон контролю викидів (ECA).

5.4. Висновки за розділом 5.

Впровадження екологічного холодоагенту R448A та суворе дотримання правил його рідкофазного заправлення, контролю герметичності й експлуатації згідно з вимогами МАРПОЛ і ДСТУ EN 378 гарантує повну безпеку судового персоналу та виключає ризики штрафних санкцій в іноземних портах.

					КРБ.142.4257см.01.05.ПЗ.05	Арк.
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		60

ВИСНОВКИ

1) У кваліфікаційній роботі виконано комплексне проєктування та теплотехнічний розрахунок суднової холодильної установки провізійних комор для суховантажного судна «SIDER KING».

2) Обґрунтовано та розраховано параметри повітряного середовища для трьох провізійних камер (м'яса та риби $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$, овочів $+2\text{ }^{\circ}\text{C}$, молочної комори $+4\text{ }^{\circ}\text{C}$) та вестибюля з урахуванням автономного плавання в тропічних широтах.

3) Застосовано сендвіч-панелі з пінополіуретану (PUR) товщиною 100 та 150 мм, що забезпечило мінімальні коефіцієнти теплопередачі ($k \approx 0,154 \dots 0,156\text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$) та дозволило розробити посилену конструкцію палуби типу «плаваючої підлоги».

4) Проведено покомпонентний розрахунок теплоприпливів від зовнішніх огорожень, термічної обробки продуктів та експлуатаційних витрат. Сумарний теплопритік до комплексу комор становить $Q_{\Sigma} = 1595,4\text{ Вт}$.

5) З урахуванням коефіцієнта запасу та часу роботи компресора, загальна необхідна холодопродуктивність установки становить $Q_0 = 2393,2\text{ Вт}$.

6) Обрано систему безпосереднього охолодження (Direct Expansion) з примусовим рухом повітря через підвісні повітроохолоджувачі. Як робоче тіло прийнято екологічний та ознобезпечний холодоагент R448A ($GWP = 1387$).

7) На основі побудованого циклу на $p-h$ -діаграмі для холодоагенту R448A визначено питомі характеристики установки. Отриманий холодильний коефіцієнт $\varepsilon = 1,83$ підтверджує енергетичну ефективність обраного одноступеневого стиснення для тропічних умов експлуатації судна.

8) На основі розрахункової об'ємної витрати пари ($7,44\text{ м}^3/\text{год}$) обрано напівгерметичний поршневий компресор Bitzer 2CES-3Y (50 Гц) з об'ємною продуктивністю $16,24\text{ м}^3/\text{год}$. Його дійсна холодопродуктивність

					КРБ.142.4257см.01.05.ПЗ.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		61

(3,12 кВт) повністю перекриває потребу камер охолодження (2,39 кВт) і забезпечує необхідний експлуатаційний запас.

9) Підбрано кожухотрубний конденсатор морського виконання Bitzer K073H з трубками з мідно-нікелевого сплаву CuNi 90/10, який одночасно виконує роль лінійного ресивера. Для комор підбрано компактні підвісні повітроохолоджувачі серії ЕСО СТЕ з вбудованими ТЕНами відтавання.

10) Сформовано специфікацію лінійної арматури Danfoss (ТРВ TEX 2, клапани EVR 3, фільтр DML) та спроектовано систему протиаварійного захисту компресора за тиском і температурою (пресостати КР 1, КР 5, модуль SE-B1).

					<i>КРБ.142.4257см.01.05.ПЗ.00</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		62

ЛІТЕРАТУРА

1. Regulation (EU) 2024/573 of the European Parliament and of the Council of 7 February 2024 on fluorinated greenhouse gases, amending Directive (EU) 2019/1937 and repealing Regulation (EU) No 517/2014 (Text with EEA relevance). Official Journal of the European Union. 2024. L 2024/573. URL: <http://data.europa.eu/eli/reg/2024/573/oj> (дата звернення: 03.04.2026).

2. Міжнародна конвенція по запобіганню забрудненню з суден (МАРПОЛ 73/78). Додаток VI: Правила запобігання забрудненню атмосфери з суден.

3. Міжнародна конвенція з охорони людського життя на морі (СОЛАС-74).

4. ДСТУ EN 378-1:2014. Системи холодильні та теплові насоси. Вимоги щодо безпеки та охорони довкілля. Частина 1. Основні вимоги, визначення, класифікація та критерії вибору. К. : Мінекономрозвитку України, 2014.

5. Правила класифікації та побудови морських суден. Том 2. Частина XII: Холодильні установки. Регістр судноплавства України.

6. Bitzer Software v6.18.0. Програмний комплекс для розрахунку параметрів циклів та підбору компресорного обладнання. Bitzer. URL: <https://www.bitzer.de>.

7. Unit Coolers ECO : Aerorevaporatori per refrigerazione [Electronic resource] / Modine CIS. — Electronic data. — Modine, 2023. — Mode of access: <https://www.modinecoolers.com> (дата звернення: 15.05.2026).

8. Coolselector 2. Danfoss. URL: <https://www.danfoss.com/uk-ua/about-danfoss/news/dcs/coolselector-2-we-did-complex-you-do-awesome/> (дата звернення: 15.04.2026).

9. Danfoss. Application Guide: Electronic expansion valves type AKVA. Danfoss, 2024.

10. Hundy G. F. Refrigeration, Air Conditioning and Heat Pumps / G. F. Hundy, A. R. Trott, T. C. Welch. 5th Edition. Butterworth-Heinemann: Elsevier Ltd, 2016. 510 p.

					КРБ.142.4257см.01.05.ПЗ.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		63

11. Гапонов С. А. Програма. Методичні вказівки та курсовий проєкт з дисципліни «Холодильна техніка та технологія» / С. А. Гапонов, І. П. Єсін, М. І. Радченко. Миколаїв : НУК, 2005. 20 с.

12. Гапонов С. А. Проектування і розрахунок теплової ізоляції суднових рефрижераторних приміщень. Ч. І. Ізоляційні матеріали і конструкції : навч. посібник / С. А. Гапонов, О. О. Лехмус, Г. Б. Журавльов. Миколаїв : УДМТУ, 2003. 44 с.

13. Загоруйко В. О. Суднова холодильна техніка : підручник / В. О. Загоруйко, О. А. Голіков. К. : Наукова думка, 2002. 576 с.

14. Радченко М. І. Суднові холодильні машини : навч. посібник / М. І. Радченко, О. О. Лехмус. Миколаїв : НУК, 2015. 392 с.

15. Теплообмінники суднових систем кондиціювання та рефрижерації : навч. посібник / М. І. Радченко, А. М. Радченко, Д. В. Коновалов, Р. М. Радченко. Миколаїв : НУК, 2014. 260 с.

					<i>КРБ.142.4257см.01.05.ПЗ.00</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		64

ДОДАТОК

					КРБ.142.4257.01.05.ПЗ.00	Арк.
						65
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		