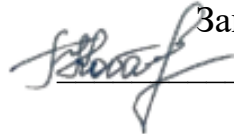


Міністерство освіти і науки України
Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова
Херсонський навчально-науковий інститут

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 трюмів
пелагічного траулера Gunnar Langva дедвейтом Dw = 1970 т»

Виконав: студент IV курсу, групи 4257
спеціальності

142 «Енергетичне машинобудування»
(шифр і назва спеціальності)

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

 Олександр АКУЛОВ
(прізвище та ініціали)

Керівник Галина КОБАЛАВА
(прізвище та ініціали)

Рецензент Іван КАЛІНІЧЕНКО
(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 **Акулова Олександра Сергійовича, група 4257**

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи **«Розробка проєкту холодильної установки для трюмів пелагічного траулера Gunnar Langva дедвейтом Dw=1970 т»**

керівник роботи **Кобалава Галина Олександрівна, 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 траулера Gunnar Langva, 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. Вибір та розрахунок 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.

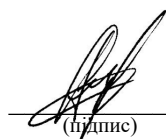
5. Дата видачі завдання « 22 » квітня 2026 року.

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.

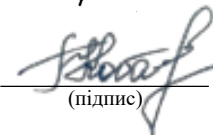
Здобувач


(підпис)

Олександр АКУЛОВ

(прізвище та ініціали)

Керівник роботи


(підпис)

Галина КОБАЛАВА

(прізвище та ініціали)

АНОТАЦІЯ

Акулов Олександр Сергійович, група 4257.

Кваліфікаційну бакалаврську роботу виконано за темою: «Розробка проєкту холодильної установки для трюмів пелагічного траулера Gunnar Langva дедвейтом $D_w = 1970$ 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.

В роботі проведена розробка системи охолодження морської води (RSW-система), яка призначена для танків наливного перевезення свіжої риби пелагічного траулера Gunnar Langva дедвейтом $D_w = 1970$ т.

Обґрунтовано вибір енергоефективного та екологічно безпечного природного холодоагенту R-717 (аміак), а також схеми одноступеневої парокомпресійної холодильної установки. Розраховано коефіцієнти теплопередачі огорожень RSW-танків з урахуванням обраної пінополіуретанової ізоляції. Визначено сумарне теплове навантаження на систему з урахуванням інтенсивного охолодження улову та розрахована необхідна холодопродуктивність компресора, що становить 241 кВт. Побудовано цикл холодильної машини на $p-h$ діаграмі та розраховані його основні термодинамічні параметри. На основі розрахунків виконано підбір основного обладнання: сучасного поршневого компресора GEA Grasso V 450, напівзварного пластинчастого конденсатора Alfa Laval MK15-BW та пластинчастого RSW-випарника Kelvion NP100 із титановими пластинами для роботи в агресивному морському середовищі. Для автоматизації процесу дроселювання та підтримання оптимального перегріву застосовано електронний розширювальний вентиль Danfoss AKVA з мікропроцесорним керуванням. У роботі також приділено увагу заходам безпеки при експлуатації аміачної установки в умовах судна.

Ключові слова: RSW-система, холодопродуктивність, поршковий компресор, пластинчастий теплообмінник.

					КРБ.142.4257.01.05.ПЗ.00	Арк.
						4
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

ABSTRACT

Oleksandr Akulov, group 4257.

Bachelor's thesis Title: "Development of a Refrigeration Plant Project for the Holds of the Pelagic Trawler Gunnar Langva with Deadweight of 1,970 tons".

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 focuses on the development of a Refrigerated Sea Water (RSW) system designed for the bulk cargo tanks used for fresh fish transport on the pelagic trawler Gunnar Langva (Dw = 1970 t).

The study justifies the selection of the energy-efficient and environmentally friendly natural refrigerant R-717 (ammonia), as well as a single-stage vapor-compression refrigeration system layout. Heat transfer coefficients for the RSW tank enclosures were calculated, taking into account the selected polyurethane foam insulation. The total thermal load on the system was determined based on the intensive cooling requirements of the catch, resulting in a required compressor cooling capacity of 241 kW. The refrigeration cycle was plotted on a p-h diagram, and its key thermodynamic parameters were calculated. Based on these calculations, the primary equipment was selected: a modern GEA Grasso V 450 reciprocating compressor, an Alfa Laval MK15-BW semi-welded plate condenser, and a Kelvion NP100 plate RSW evaporator equipped with titanium plates for operation in corrosive marine environments. To automate the throttling process and maintain optimal superheat, a microprocessor-controlled Danfoss AKVA electronic expansion valve was utilized. The work also addresses safety measures for the operation of ammonia-based units in maritime conditions.

Keywords: RSW system, cooling capacity, reciprocating compressor, plate heat exchanger.

					<i>КРБ.142.4257.01.05.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.....	15
1.4. Енергетична установка.	15
1.5. Висновки за розділом 1.....	16
РОЗДІЛ 2. ТЕПЛОВІ РОЗРАХУНКИ КОМПЛЕКСУ РЕФРИЖЕРАЦІЇ.....	18
2.1. Вибір параметрів повітря та води в залежності від району плавання судна та параметрів продуктів, що зберігаються.....	18
2.2. Вибір ізоляційних конструкцій огорож приміщення, що охолоджуються.	20
2.3. Визначення сумарного теплопритоку і холодопродуктивності СХУ.....	25
2.4. Вибір системи охолодження та холодильного агенту.....	27
2.5. Висновки за розділом 2.....	31
РОЗДІЛ 3. ПРОЄКТУВАННЯ ХОЛОДИЛЬНОЇ МАШИНИ	34
3.1. Побудова циклу холодильної машини на p, h -діаграмі та його розрахунок.....	34
3.2. Підбір холодильного компресора, теплообмінних апаратів та іншого устаткування холодильної установки.....	36
3.3. Розміщення обладнання холодильної установки у приміщенні.....	45
3.4. Висновки за розділом 3.....	46
РОЗДІЛ 4. АВТОМАТИЗАЦІЯ ТА СПЕЦИФІКАЦІЯ ОБЛАДНАННЯ СХУ... ..	49
4.1. Вибір та розрахунок лінійної автоматики.....	49
4.2. Система автоматичного захисту та контролю.....	52
4.3. Специфікація основного обладнання та засобів автоматизації.....	52

					КРБ.142.4257.01.05.ПЗ.00	Арк.
						6
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

4.4. Висновки по розділу 4.....	53
РОЗДІЛ 5. ОХОРОНА ПРАЦІ.....	56
5.1. Аналіз небезпек в машинному відділенні на рефрижераторних суднах..	56
5.2. Заходи безпеки при роботі з R-717.....	58
5.3. Висновки за розділом 5.....	60
ВИСНОВКИ	61
ЛІТЕРАТУРА	63
ДОДАТОК	65

					КРБ.142.4257.01.05.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;
 $\dot{m}$ – 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;
 N_e – ефективна потужність на валу компресора, кВт;
 k – коефіцієнт теплопередачі огороження, Вт/(м²·К).

Абревіатури та скорочення:

- СХУ – суднова холодильна установка;
 ПКХМ – парокомпресійна холодильна машина;
 RSW (Refrigerated Sea Water) – система охолодження морської води;
 ПТО – пластинчастий теплообмінник;
 ЕРВ – електронний розширювальний вентиль;
 ТРВ – терморегулюючий вентиль;
 МВ – машинне відділення;

					КРБ.142.4257.01.05.ПЗ.00	Арк.
						8
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

ЗІЗ – засоби індивідуального захисту;

ГФУ / ГФО – гідрофторвуглеці / гідрофторолефіни (типи фреонів);

GWP (Global Warming Potential) – потенціал глобального потепління;

ППУ – пінополіуретан (ізоляційний матеріал);

Dw – дедвейт судна (повна вантажопідйомність), т.

					КРБ.142.4257.01.05.ПЗ.00	Арк.
						9
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

ВСТУП

Сучасний етап розвитку світового рибопромислового флоту характеризується інтенсивним впровадженням високоефективних технологій вилову та переробки водних біоресурсів. Пелагічний промисел, що орієнтований на вилов риби у верхніх шарах океану, потребує особливої уваги до збереження якості сировини безпосередньо з моменту підйому трала. В умовах віддаленості районів промислу від портів базування, роль судових холодильних установок (СХУ) стає визначальною для забезпечення конкурентоспроможності продукції та мінімізації втрат.

Пелагічний траулер Gunnar Langva із дедвейтом 1970 т є представником сучасного флоту, де ефективність експлуатації залежить від надійності енергетичної установки та системи холодозабезпечення трюмів. Проектування холодильної установки для такого судна вимагає комплексного підходу, що враховує не лише необхідну холодопродуктивність, а й обмежені габарити машинного відділення, вимоги екологічної безпеки щодо холодоагентів та енергоефективність циклів. Використання сучасних методів термодинамічного розрахунку та підбору обладнання дозволяє створити систему, яка здатна підтримувати стабільні температурні режими у трюмах за різних умов плавання, включаючи райони з високими температурами забортної води та повітря.

Метою роботи є розробка проєкту холодильної установки для трюмів пелагічного траулера Gunnar Langva дедвейтом 1970 т, що забезпечить надійне зберігання продукції з дотриманням усіх техніко-економічних та санітарних норм.

Об'єктом дослідження є процес забезпечення та підтримання заданих параметрів температурно-вологісного режиму в охолоджуваних трюмах судна.

Предметом дослідження є судова холодильна машина, її робочі цикли, конструктивні особливості теплообмінних апаратів та систем автоматизації, що застосовуються на суднах пелагічного промислу.

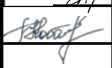
					КРБ.142.4257.01.05.ПЗ.00	Арк.
						10
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

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

- Проаналізувати технічні характеристики судна та визначити умови експлуатації СХУ.
- Виконати розрахунок теплоприпливів у трюми з урахуванням особливостей ізоляції корпусу та параметрів зовнішнього середовища.
- Обґрунтувати вибір холодильного агенту та принципової схеми системи охолодження.
- Провести термодинамічний розрахунок циклу холодильної машини на p-h діаграмі.
- Здійснити підбір основного та допоміжного обладнання: компресорів, конденсаторів, випарників (повітроохолоджувачів).
- Виконати конструктивний розрахунок одного з теплообмінних апаратів.
- Розглянути питання охорони праці та техніки безпеки при експлуатації холодильного обладнання на судні.

Структура та обсяг кваліфікаційної роботи. Робота складається зі вступу, п'яти розділів, висновків, списку використаних джерел. Загальний обсяг розрахунково-пояснювальної записки становить 64 сторінки, 7 рисунків та 7 таблиць.

					КРБ.142.4257.01.05.ПЗ.00	Арк.
						11
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

					КРБ.142.4257.01.05.ПЗ.01			
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	Розділ 1	Літ.	Арк.	Аркушів
Студент		Акулов О.С.						
Керівник		Кобалава Г.О.						
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 Gunnar Langva є сучасним пелагічним траулером-сейнером (Purse Seiner / Pelagic Trawler). Воно призначене для промислу пелагічних видів риб (оселедець, макрель, путасу, мойва) у відкритому морі за допомогою кільцевого невода або пелагічного трала. Основною особливістю судна є наявність системи RSW (Refrigerated Sea Water), що дозволяє охолоджувати вилов безпосередньо в танках із забортною водою до температури близько 0...-1 °С, зберігаючи високу якість сировини до моменту вивантаження на берег.

1.1.2. Район плавання та умови експлуатації

Район плавання судна – необмежений. Основними регіонами експлуатації є Північна Атлантика, Норвезьке та Північне моря.

Умови експлуатації для розрахунку холодильної установки приймаються згідно з тропічними нормами (для забезпечення запасу потужності):

- Температура зовнішнього повітря: +35°C.
- Температура забортної води: +25...+32°C.
- Відносна вологість повітря: 70-80 %.

1.1.3. Архітектурно-конструктивний тип судна

Судно – одногвинтове, зі сталевим суцільнозварним корпусом, транцевою кормою та баком, що тягнеться до середини судна. Машинне відділення розташоване в кормовій частині. Середню частину корпусу займають ізольовані RSW-танки (трюми), розділені поздовжніми та поперечними переборками для забезпечення остійності при перевезенні рідкого вантажу. Надбудова з ходовим містком розташована ближче до носової частини, що звільняє кормову палубу для роботи з промисловим спорядженням.

					КРБ.142.4257.01.05.ПЗ.01	Арк.
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		13

1.1.4. Клас судна.

Судно побудоване під наглядом класифікаційного товариства DNV (Det Norske Veritas). Клас судна: +1A1, Fishing Vessel (N), TMON. Це означає, що судно відповідає найвищим стандартам безпеки для рибальських суден, має автоматизоване машинне відділення та підготовлене до роботи в суворих кліматичних умовах.



Рис. 1.1. Судно Gunnar Langva.

1.1.5. Морехідні якості судна

Судно має високі морехідні якості, що дозволяють вести промисел при хвилюванні моря до 6 балів.

Ходкість. Максимальна швидкість у баласті становить близько 16 вузлів, експлуатаційна швидкість з вантажем – 13-14 вузлів.

Остійність. Забезпечується конструкцією та розподілом вантажних танків, відповідає вимогам ІМО щодо суден даного типу.

Автономність. Визначається запасами палива та провізії і становить близько 20-30 діб.

					КРБ.142.4257.01.05.ПЗ.01	Арк.
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		14

1.2. Основні технічні характеристики судна.

Нижче наведено основні розмірні характеристики траулера Gunnar Langva (табл. 1.1)

Таблиця 1.1. Основні розмірні характеристики траулера Gunnar Langva

Довжина найбільша, м	71,0
Довжина між перпендикулярами, м	63,0
Ширина найбільша, м	14,40
Висота борту, м	9,50
Осадка по КВЛ, м	7,5
Валова місткість (GT), т	2223
Дедвейт, т	1970
Загальний об'єм RSW-танків, м ³	2000

1.3. Експлуатаційні режими.

Для холодильної установки судна характерні три основні режими роботи:

1. Режим охолодження морської води (Pre-cooling): Підготовка танків перед прийомом риби. Потребує максимальної холодопродуктивності для швидкого зниження температури води в танках.

2. Режим охолодження улову: Найбільш енерговитратний режим, коли в танки подається свіжа риба з температурою забортної води.

3. Режим зберігання: Підтримання стабільної температури 0...-1,5 °C під час переходу до порту. Навантаження на компресори мінімальне, працює лише для компенсації теплоприпливів крізь ізоляцію.

1.4. Енергетична установка.

Енергетична установка розташовується в кормовій частині судна. Розташування механізмів і прокладка труб у машинно-котельному відділенні виконана з урахуванням зручності й безпеки їхнього обслуговування, огляду й ремонту.

					КРБ.142.4257.01.05.ПЗ.01	Арк.
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		15

Головна енергетична установка (ГЕУ) судна представлена середньооборотним дизельним двигуном (типу Wärtsilä) потужністю близько 4500-5000 кВт.

Привод гребного гвинта. Гвинт регульованого кроку (ГРК) у насадці для підвищення тяги під час тралення.

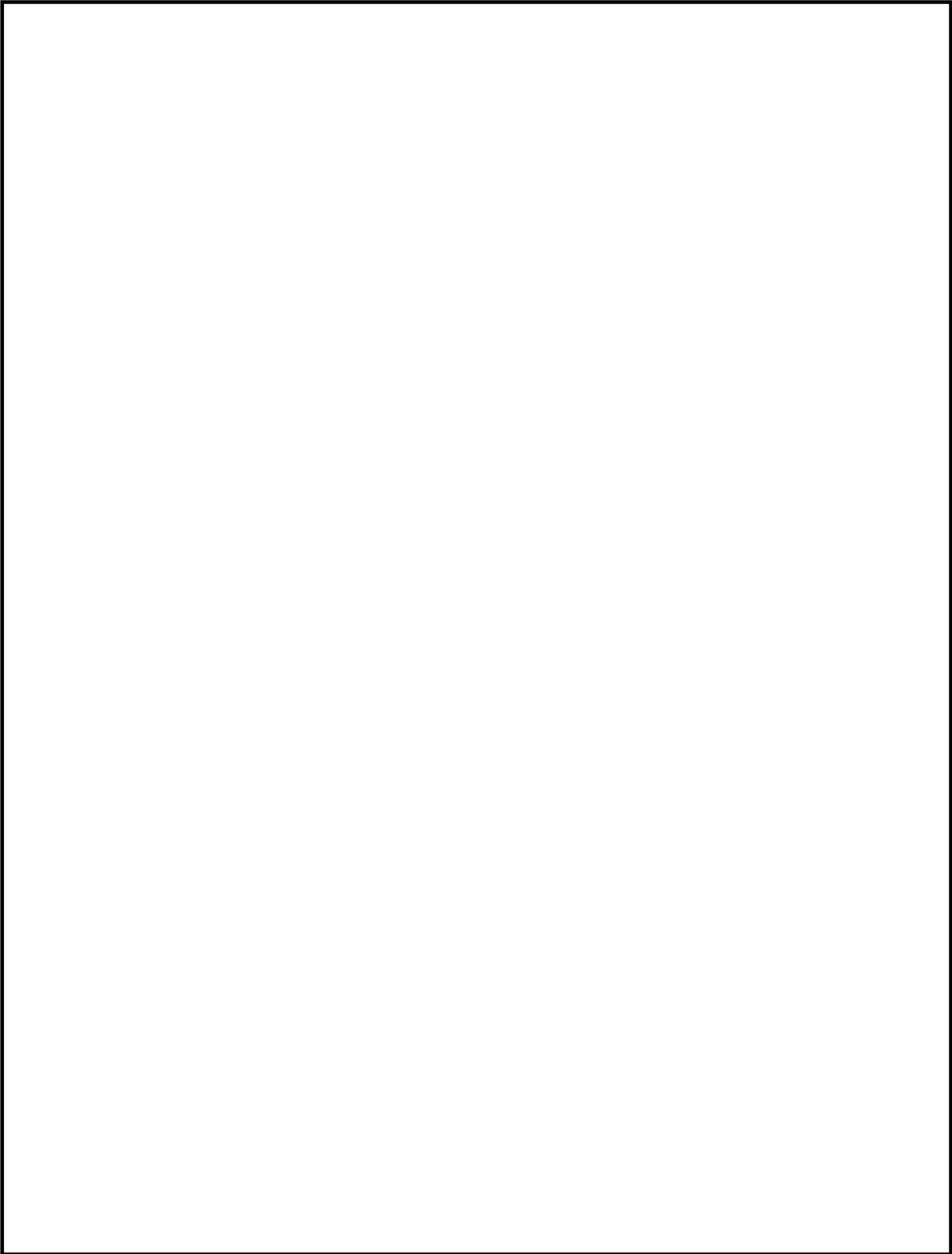
Електростанція включає валогенератор (використовується на ходу для живлення потужних компресорів холодильної установки та насосів) та 2 допоміжні дизель-генератори, і 1 аварійний дизель-генератор загальною потужністю близько 1500 кВт для стояночних та аварійних режимів.

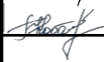
Для головного двигуна, дизель-генераторів й аварійного дизель-генератора застосовуються мастила схвалені фірмами-постачальниками.

1.5. Висновки за розділом 1.

Проведений аналіз об'єкта проєктування показує, що пелагічний траулер Gunnar Langva – це високотехнологічне судно, ефективність якого критично залежить від роботи системи холодозабезпечення. Враховуючи дедвейт 1970 т та об'єм танків 2000 м³, майбутня холодильна установка повинна мати високу питому холодопродуктивність. Основним завданням при подальшому проєктуванні буде розрахунок теплоприпливів з урахуванням специфіки конструкції RSW-танків та підбір обладнання, здатного працювати в умовах змінного навантаження (від пікового охолодження до економічного зберігання).

					КРБ.142.4257.01.05.ПЗ.01	Арк.
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		16



					КРБ.142.4257.01.05.ПЗ.02							
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата								
Студент		Акулов О.С.			Розділ 2				Літ.	Арк.	Аркушів	
Керівник		Кобалава Г.О.										
									ХННІ НУК			
Консульт.												
Зав.каф.		Кобалава Г.О.							17			

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 роботи суднових систем кондиціювання повітря (СКП) та рефрижераторних установок безпосередньо залежить від коректного вибору параметрів навколишнього середовища. Оскільки судно є рухомим об'єктом, що перетинає різні кліматичні зони, розрахунок ведеться за екстремальними (граничними) значеннями для конкретного району плавання.

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.142.4257.01.05.ПЗ.02	Арк.
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		18

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

де t – температура повітря, °C;

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.

Вибір температури ($t_{\text{вн}}$) та вологості ($\phi_{\text{вн}}$) всередині судна залежить від призначення приміщення (табл. 2.1).

Таблиця 2.1. Параметри повітря в залежності від типу приміщень.

Тип приміщення	Літній режим (t, °C / ϕ , %)	Зимовий режим (t, °C / ϕ , %)
Житлові каюти	24...26 / 45...60	18...20 / 40...50
Громадські приміщення	25...27 / 50...60	18...22 / 30...50
Провізійні комори	Залежить від продукту (від -25 до +4)	Залежить від продукту (від -25 до +4)
Машинне відділення	$t+(5...10)$	не нижче +5

При проектуванні 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 30 °С.

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

Розрахункові параметри повітря для приміщень різного призначення встановлюються на підставі результатів санітарно-гігієнічних досліджень та наводяться в Санітарних правилах для морських суден 2000 р.

2.2. Вибір ізоляційних конструкцій огорож приміщення, що охолоджуються.

Головним споживачем холоду в суднових системах рефрижерації є теплоприпливи, що проникають крізь конструкції огорож трюмів або танків. Для пелагічного траулера Gunnar Langva, де вантаж (риба) зберігається в RSW-танках при температурах близько –1...–1,5 °С, важливо забезпечити мінімальний коефіцієнт теплопередачі k та виключити можливість зволоження ізоляції.

Ізоляційні матеріали – це спеціальні матеріали, що володіють порівняно низькими коефіцієнтами теплопровідності і призначені для ізоляції огорожувальних конструкцій охолоджуваних приміщень, зменшення теплопритоків у них.

					КРБ.142.4257.01.05.ПЗ.02	Арк.
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		20

До ізоляційних матеріалів, що використовуються в суднових холодильних камерах, висувається ряд специфічних вимог, оскільки вони повинні забезпечувати ефективне зменшення теплопритоків у охолоджувані приміщення.

Основними вимогами до ізоляційних матеріалів є:

1. Низький коефіцієнт теплопровідності для забезпечення максимального термічного опору.
2. Мала густина, що важливо для обмеження загальної ваги судна.
3. Висока механічна міцність та еластичність, щоб витримувати вібрації та навантаження.
4. Морозостійкість, оскільки матеріали працюють в умовах низьких температур.
5. Вогнестійкість та негорючість для забезпечення пожежної безпеки судна.
6. Відсутність запахів та стійкість до їх поглинання, щоб не псувати харчові продукти.
7. Мала вологомісткість та гігроскопічність, оскільки волога значно підвищує теплопровідність матеріалу.
8. Мінімальна усадка (для насипних матеріалів).
9. Хімічна інертність: матеріал не повинен спричиняти або посилювати корозію поверхонь, з якими він контактує.
10. Безпечність для здоров'я людей та відсутність шкідливих виділень.
11. Біологічна стійкість: достатня опірність до гнильних бактерій, грибків та нездатність сприяти розмноженню паразитів.
12. Економічна доцільність: низька вартість, доступність, довговічність, а також зручність при транспортуванні та монтажі.

Важливо зазначити, що жоден з наявних матеріалів не задовольняє всім вимогам одночасно, тому при проектуванні вибирають той варіант, який найкраще відповідає пріоритетним потребам конкретного судна та району

					КРБ.142.4257.01.05.ПЗ.02	Арк.
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		21

його плавання. Також існують вимоги до обслуговування: при ремонті ізоляції необхідно використовувати ті ж самі матеріали, фарби та клеї, що застосовувалися під час первинного монтажу.

На основі аналізу сучасних суднобудівних стандартів для даного типу судна обираємо пінополіуретан (ППУ), який наноситься методом напилення або монтажу сендвіч-панелей.

Переваги ППУ: низький коефіцієнт теплопровідності, мала гігроскопічність (завдяки закритій структурі пор), легкість та висока адгезія до металевих поверхонь корпусу. Розрахунковий коефіцієнт теплопровідності $\lambda_{із} = 0,028 \dots 0,032 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$.

Для розрахунку коефіцієнта теплопередачі $k [\text{Вт/(м}^2\cdot\text{К)}]$ для окремих огорожень трюма розміром $L = 4\text{м}$, $B = 5\text{м}$, $H = 4\text{м}$ на пелагічному траулері, необхідно врахувати специфіку морської ізоляції: наявність металевих набору (шпангоутів, бімсів, стрингерів), які створюють «містки холоду».

Для забезпечення заданого температурного режиму ($-1,5 \text{ }^\circ\text{C}$) у RSW-танках при зовнішній температурі до $+35 \text{ }^\circ\text{C}$, використовується ізоляція з пінополіуретану (ППУ) з коефіцієнтом теплопровідності $\lambda_{із} = 0,03 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$.

Загальна формула для розрахунку технічного коефіцієнта теплопередачі з урахуванням теплових містків:

$$k = k_{ізол} \cdot \beta$$

де $k_{ізол}$ – теоретичний коефіцієнт теплопередачі чистого ізоляційного шару;

β – коефіцієнт, що враховує вплив металевих набору судна (для морських суден $\beta = 1,2 \dots 1,5$).

Теоретичний коефіцієнт обчислюється за формулою:

$$k_{ізол} = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{зовн}} + \frac{\delta_{із}}{\lambda_{із}} + \frac{1}{\alpha_{вн}}}$$

					КРБ.142.4257.01.05.ПЗ.02	Арк.
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		22

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).

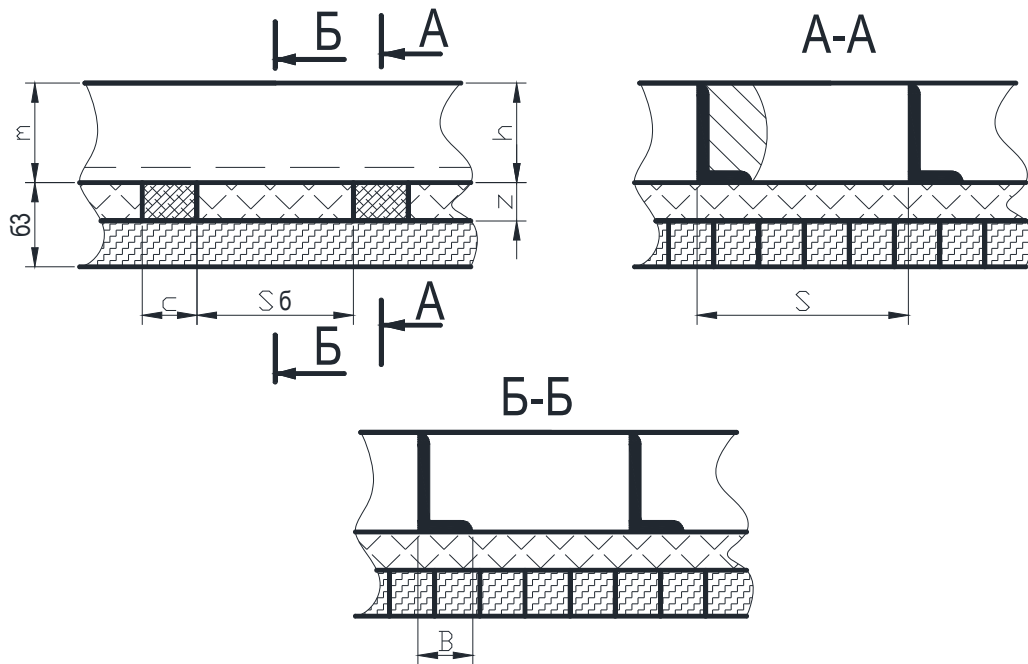


Рис 2.1 Перекриваючий набір з перпендикулярним розташуванням брусків набору

Розрахунок для підволоку (верхня палуба).

Підволок межує з відкритим повітрям ($t_{\text{зовн}} = +35 \text{ }^{\circ}\text{C}$). Через сонячну радіацію цей елемент є найбільш теплонапруженим.

- Товщина ізоляції: $\delta = 120 \text{ мм (0,12 м)}$.
- Коефіцієнт тепловіддачі зовні (повітря): $\alpha_{\text{зовн}} = 23 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}$.
- Коефіцієнт тепловіддачі всередині (вода/лід): $\alpha_{\text{вн}} = 12 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}$.
- Коефіцієнт набору: $\beta = 1,3$.

$$k_{\text{підв}} = \frac{1}{\frac{1}{23} + \frac{0,12}{0,03} + \frac{1}{12}} \cdot 1,3 = 0,315 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}$$

Розрахунок для бортів.

Борти судна Gunnar Langva частково знаходяться під водою. Розрахунок ведеться для підводної частини ($t_b = +32\text{ }^{\circ}\text{C}$).

- Товщина ізоляції: $\delta = 100\text{ мм (0,1 м)}$.
- Коефіцієнт тепловіддачі зовні (морська вода): $\alpha_{\text{зовн}} = 500 \dots 1000\text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}$.
- Коефіцієнт тепловіддачі всередині (вода/лід): $\alpha_{\text{вн}} = 12\text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}$.
- Коефіцієнт набору: $\beta = 1,4$ (через щільний набір шпангоутів).

$$k_{\text{борт}} = \frac{1}{\frac{1}{1000} + \frac{0,1}{0,03} + \frac{1}{12}} \cdot 1,4 = 0,41\text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}$$

Розрахунок для перебірок (між танком та машинним відділенням).

Це одна з найбільш критичних ділянок, оскільки в МВ температура може сягати $+45\text{ }^{\circ}\text{C}$.

- Товщина ізоляції: $\delta = 120\text{ мм (0,12 м)}$.
- Коефіцієнт тепловіддачі зовні (повітря): $\alpha_{\text{зовн}} = 15\text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}$.
- Коефіцієнт тепловіддачі всередині (вода/лід): $\alpha_{\text{вн}} = 12\text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}$.
- Коефіцієнт набору: $\beta = 1,3$.

$$k_{\text{переб}} = \frac{1}{\frac{1}{15} + \frac{0,12}{0,03} + \frac{1}{12}} \cdot 1,3 = 0,313\text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}$$

Розрахунок для днища.

Днище постійно омивається водою. Конструкція має потужний набір (флори).

- Товщина ізоляції: $\delta = 100\text{ мм (0,1 м)}$.
- Коефіцієнт тепловіддачі зовні (морська вода): $\alpha_{\text{зовн}} = 500 \dots 1000\text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}$.
- Коефіцієнт тепловіддачі всередині (вода/лід): $\alpha_{\text{вн}} = 12\text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}$.
- Коефіцієнт набору: $\beta = 1,5$ (через флори).

					<i>КРБ.142.4257.01.05.ПЗ.02</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		24

$$k_{\text{дн}} = \frac{1}{\frac{1}{1000} + \frac{0,1}{0,03} + \frac{1}{12}} \cdot 1,5 = 0,439 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$$

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)
Підволоок (палуба)	20	120	0,315
Борти (зовнішні)	40	100	0,410
Перебірки (внутрішні)	32	120	0,313
Днище	20	100	0,439
Разом	112	—	0,37

2.3. Визначення сумарного теплопритоку і холодопродуктивності СХУ.

Розрахунок проводиться для режиму максимального навантаження – охолодження свіжовиловленої риби (оселедець/макрель) у морській воді. Сумарний теплопритік Q_{Σ} (Вт) визначається за формулою:

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

Теплоприпливи через зовнішні огороження (Q_1).

Цей теплоприплив залежить від геометричних розмірів танка та якості ізоляції.

Геометричні характеристики одного танка:

- Довжина (L): 5 м;
- Ширина (B): 4 м;
- Висота (H): 4 м;
- Об'єм (V): 80 м³;

- Площа поверхні (F): 112 м².

Розрахунок ведеться за формулою:

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

Таблиця 2.3. Розрахункові значення для елементів трюма.

	$F, \text{м}^2$	$k, \text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$	$t_{\text{зовн}}, ^\circ\text{C}$	$t_{\text{вн}}, ^\circ\text{C}$	$Q_1, \text{Вт}$
Підволік (палуба)	20	0,315	35	-1,5	233,6
Борти (зовнішні)	40	0,410	32	-1,5	549,4
Перебірки (до МВ)	16	0,313	45	-1,5	230,6
Перебірки (сусідні)	16	0,439	20	-1,5	106,6
Днище	20	0,44	32	-1,5	294,8
Разом	112				1415

$$Q_{\Sigma} = 1,415 \text{ кВт}$$

Теплоприплив від об'єкта охолодження (Q_2).

Це головний складник для RSW-танків. Він виникає при охолодженні риби від температури заборотної води до температури зберігання.

Розрахунок ведеться за формулою:

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

Приймаємо масу риби в одному танку $m \approx 40$ тон (при щільності завантаження з водою), час охолодження $\tau = 6$ годин, питома теплоємність риби $c = 3,3 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$.

Початкова температура риби: $t_{\text{поч}} = +32 ^\circ\text{C}$ (температура заборотної води).

Кінцева температура: $t_{\text{кін}} = -1,5 ^\circ\text{C}$.

$$Q_2 = \frac{40000 \cdot 3300 (32 - (-1,5))}{6 \cdot 3600} = 204722 \text{ Вт}$$

Теплоприплив від роботи циркуляційних насосів (Q_3).

					КРБ.142.4257.01.05.ПЗ.02	Арк.
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		26

Вода в RSW-системі постійно прокачується насосами через теплообмінник. Електрична енергія насосів перетворюється на теплову. Для танка такого об'єму зазвичай використовується насос потужністю близько 12 кВт. Приймаємо, що в воду переходить 80% теплоти:

$$Q_3 = 12 \cdot 0,8 = 9,6 \text{ кВт}$$

Додаткові теплоприпливи (Q_4).

Враховуємо теплоту дихання риби та випадкові теплоприпливи (через люки, освітлення під час замірів тощо). Для даного типу судна приймаємо:

$$Q_4 \approx 3,0 \text{ кВт}$$

Загальний тепловий баланс.

Сумарне теплове навантаження на один трюм:

$$Q_{\Sigma} = 1,415 + 204,722 + 9,6 + 3 = 218,7 \text{ кВт}$$

Необхідна проєктна холодопродуктивність компресора з урахуванням коефіцієнта запасу ($k_z = 1,1$):

$$Q_p = 1,1 \cdot 218,7 = 240,6 \text{ кВт}$$

Основним джерелом теплового навантаження є охолодження улову (Q_2), що становить близько 94% від загального балансу.

Теплоприпливи крізь ізоляцію (Q_1) настільки малі порівняно з масою вантажу, що підтверджують високу ефективність обраної ізоляції ППУ.

Для забезпечення технологічного процесу охолодження в одному танку протягом 6 годин, судно повинно мати холодильну установку потужністю не менше 241 кВт на кожен танк, що працює одночасно.

2.4. Вибір системи охолодження та холодильного агенту.

Вибір оптимальної системи охолодження для RSW-танків та рефрижераторних приміщень пелагічного траулера базується на комплексному аналізі техніко-експлуатаційних показників. Сучасний підхід

					КРБ.142.4257.01.05.ПЗ.02	Арк.
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		27

вимагає суворого дотримання вимог енергоефективності та екологічної безпеки згідно з актуальними міжнародними регламентами [1].

Основні критерії вибору системи охолодження:

1. Геометрія та розташування об'єктів. Для траулера Gunnar Langva критичним є врахування об'єму танків (2000 м³) та їх близькості до джерел тепловиділення (машинне відділення). Точне визначення теплового навантаження дозволяє уникнути надмірної встановленої потужності компресорів.

2. Технологічний температурний режим. Пелагічний вилов (оселедець, макрель) потребує швидкого охолодження до температури – 1...– 1,5 °С. Система повинна нівелювати пікові навантаження під час прийому улову та підтримувати стабільність поля температур у всьому об'ємі танка.

3. Екологічність та безпека робочого тіла. Вибір холодоагенту в 2026 році визначається його потенціалом глобального потепління (GWP). Використання агентів з високим GWP (наприклад, R404A) обмежене законодавчо, що стимулює перехід на природні речовини (NH₃, CO₂) або сучасні суміші (HFO).

4. Енергоефективність (COP). Високий холодильний коефіцієнт безпосередньо знижує витрати палива судна. Впровадження частотного регулювання приводів компресорів та насосів є стандартом для сучасних СХУ.

5. Нормативна відповідність. Система повинна відповідати вимогам Класифікаційних товариств (DNV) та міжнародним екологічним протоколам щодо захисту озонового шару та клімату.

6. Експлуатаційна надійність. Враховуючи роботу в суворих умовах Північної Атлантики, обладнання повинно мати високий ресурс (MTBF) та стійкість до корозійного впливу морської води.

					КРБ.142.4257.01.05.ПЗ.02	Арк.
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		28

7. Сервісна доступність. Можливість швидкого обслуговування в портах базування та наявність сертифікованих компонентів на ринку є вирішальним фактором для мінімізації простоїв судна.

8. Потенціал модернізації. Конструкція повинна передбачати можливість майбутньої адаптації до нових типів масел або систем автоматичного моніторингу витоків.

9. Сукупна вартість. Оцінюються не лише початкові інвестиції, а й витрати на енергоносії, регламентне обслуговування та утилізацію протягом 20-річного життєвого циклу.

Обґрунтування типу системи охолодження

Для пелагічного траулера Gunnar Langva найбільш раціональною є система охолодження морською водою (RSW) у поєднанні з допоміжним повітряним охолодженням для провізійних комор.

Система RSW забезпечує:

- Високу інерційність: велика маса води в танках запобігає швидкому нагріванню улову при короткочасних зупинках машин.
- Ефективне тепловідведення: безпосередній контакт риби з охолодженим середовищем дозволяє у 3-5 разів швидше знизити температуру продукту порівняно з повітряним охолодженням.
- Рівномірність температурного поля: примусова циркуляція води крізь танки виключає появу «гарячих точок».
- Збереження якості: відсутність усушки вантажу, що є критичним для збереження ваги та товарного вигляду пелагічних видів риб.

Аналіз та вибір холодильного агенту

Історично на суднах такого типу використовувався холодоагент R22, який мав чудові термодинамічні характеристики, але через високий потенціал руйнування озонного шару (ODP) був повністю виведений з обігу. Його наступник R404A, хоча й безпечний для озону, має критично високий GWP

					КРБ.142.4257.01.05.ПЗ.02	Арк.
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		29

(3922), що робить його експлуатацію в 2026 році економічно недоцільною через високі екологічні податки та квоти.

Як сучасну альтернативу для проєкту Gunnar Langva розглянуто:

– **Аміак (R717).** Природний агент з нульовими ODP та GWP. Має найвищу питому холодопродуктивність, що дозволяє зменшити габарити теплообмінників. Попри токсичність, сучасні системи безпеки (автоматичні газоаналізатори, скрубери) роблять його пріоритетним вибором для рибпромислового флоту.

– **R448A/R449A.** Екологічні HFO-суміші. Вони характеризуються низьким GWP (≈ 1300) та стабільністю, проте поступаються аміаку в енергоефективності при великих потужностях.

Визначення параметрів, а також показників перетворення (COP) проведені за допомогою програми Coolselector2 [6].

Для розрахунку і підбору були вибрані такі холодильні агенти: R-717, R-404a, R-448a, R-449a (табл. 2.4).

Таблиця 2.4. Основні показники циклів порівнюваних холодильних агентів

Параметр, його одиниці вимірювання	R-717 (Аміак)	R-404a	R-448a	R-449a
Тиск всмоктування, МПа	0,331	0,488	0,471	0,470
Тиск нагнітання, МПа	1,555	1,816	1,875	1,870
Відношення тиску в ступені компресора	4,70	3,72	3,98	3,98
Масова витрата холодильного агента, кг/с	0,221	2,252	1,662	1,672
Електрична потужність компресора, кВт	79,5	102,6	90,9	130,6
Теоретичний холодильний коефіцієнт циклу	4,03	2,35	2,65	2,63

Аналіз отриманих результатів для траулера Gunnar Langva:

1. Енергоефективність. Використання аміаку дозволяє знизити теоретичне споживання потужності на 23,1 кВт (майже на 22,5%) порівняно з R-404a. Для суднової мережі це значне розвантаження дизель-генераторів, що веде до прямої економії палива.

2. Гідравліка системи. Масова витрата аміаку (0,221 кг/с) у 10 разів менша, ніж у R-404a. Це означає, що при будівництві судна знадобиться значно менше метрів дорогої мідної або сталевий труби, а діаметри арматури будуть компактнішими.

3. Екологічний фактор. R-448a та R-449a є гарною альтернативою фреону, але аміак залишається «майбутньою» технологією через нульовий вуглецевий слід, що важливо для суден, які працюють у територіальних водах ЄС та Норвегії.

Для потужності 241 кВт аміачна установка є найбільш технічно та економічно обґрунтованим рішенням.

2.5. Висновки за розділом 2.

У другому розділі було проведено комплекс теплотехнічних розрахунків, результати яких стали підґрунтям для подальшого проєктування суднової холодильної установки (СХУ) траулера Gunnar Langva. За результатами роботи зроблено наступні висновки:

1. Встановлено розрахункові параметри середовища: виходячи з необмеженого району плавання судна, за основу прийнято тропічні умови ($t_{\text{зовн}} = +35\text{ }^{\circ}\text{C}$, $t_{\text{вн}} = +32\text{ }^{\circ}\text{C}$). Це гарантує необхідний запас потужності СХУ для ефективної роботи в будь-якій точці Світового океану.

2. Обґрунтовано вибір ізоляції: для теплового захисту RSW-танків обрано пінополіуретанову ізоляцію, нанесену методом напилення. Розрахункові коефіцієнти теплопередачі для огорожень склали 0,31 ... 0,44

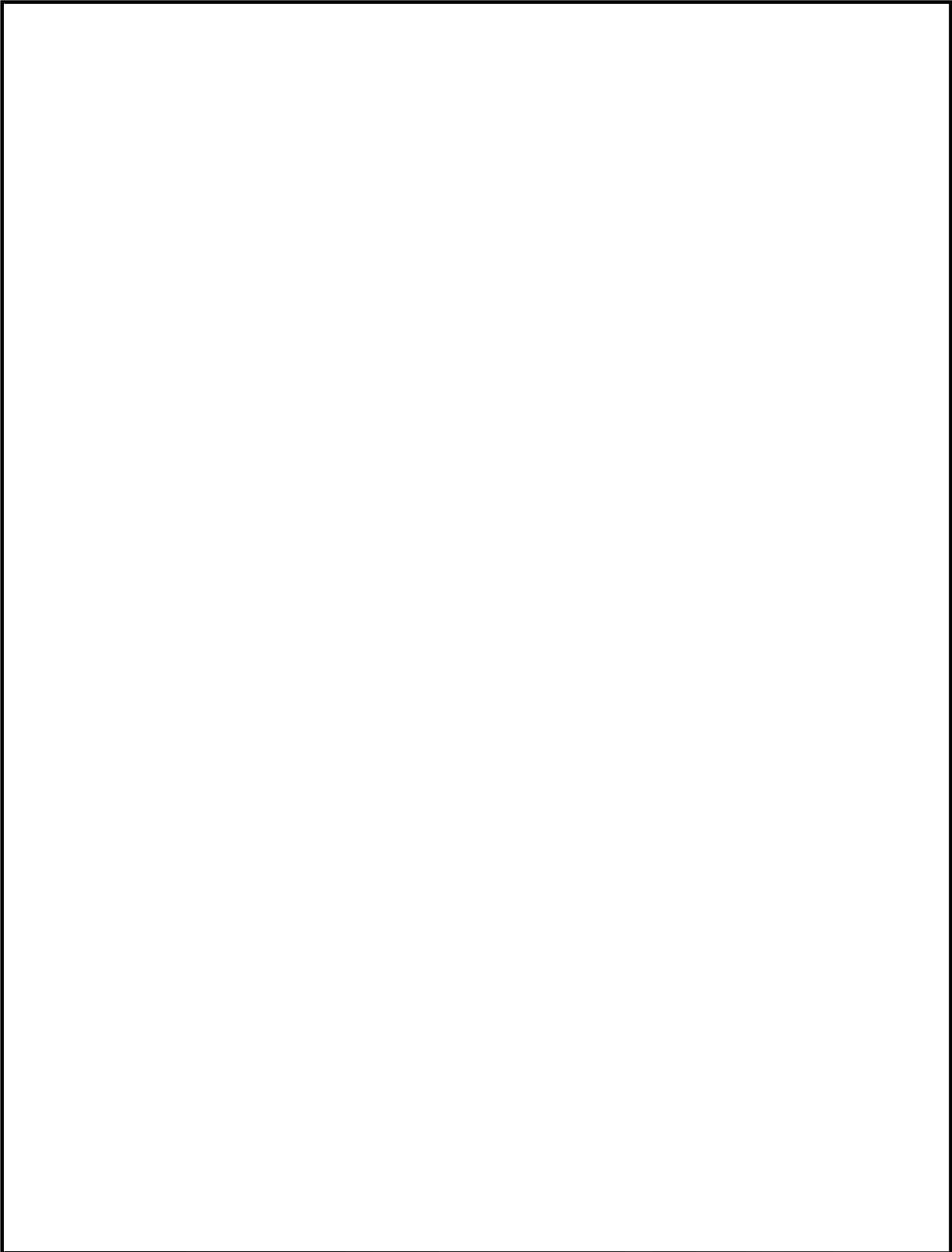
					КРБ.142.4257.01.05.ПЗ.02	Арк.
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		31

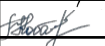
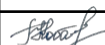
Вт/(м²·К), що відповідає сучасним стандартам енергоефективності суднобудування.

3. Сформовано тепловий баланс: розрахунок сумарного теплопритоку показав, що основним споживачем холоду є процес охолодження свіжовиловленої риби (понад 90% навантаження), тоді як теплоприпливи крізь ізоляцію є незначними. Необхідна проєктна холодопродуктивність компресора визначена на рівні 241 кВт.

4. Визначено робоче тіло та систему охолодження: на основі порівняльного аналізу техніко-економічних та екологічних показників для системи RSW було обрано природний холодоагент Аміак (R-717). Він продемонстрував найвищу енергоефективність (COP = 4,03) та нульовий потенціал глобального потепління порівняно з сучасними фреонами (R-404a, R-448a/449a).

					КРБ.142.4257.01.05.ПЗ.02	Арк.
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		32



					КРБ.142.4257.01.05.ПЗ.03			
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	Розділ 3	Літ.	Арк.	Аркушів
Студент		Акулов О.С.						
Керівник		Кобалава Г.О.						
Консульт.								
Зав.каф.		Кобалава Г.О.				ХННІ НУК		
						33		

РОЗДІЛ 3. ПРОЄКТУВАННЯ ХОЛОДИЛЬНОЇ МАШИНИ

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

В СХУ широке розповсюдження отримали одноступеневі парокомпресорні холодильні машини (ПКХМ). Принципова схема ПКХМ зображена на рис.3.1

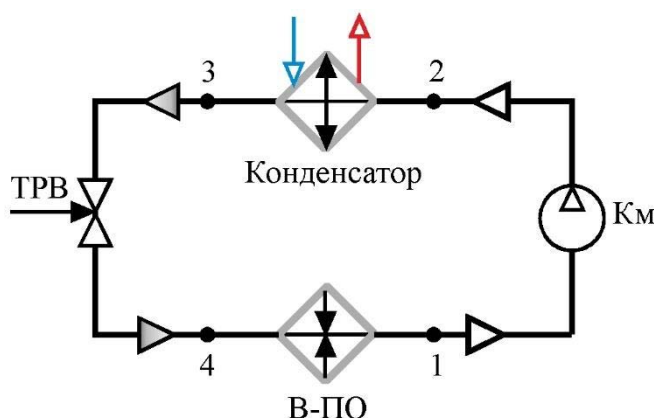


Рис. 3.1 Принципова схема парокомпресорної холодильної машини. К_м – компресор К_н – конденсатор; ТРВ – терморегулюючий вентиль; В-ПО – випарник-повітроохолоджувач.

Для проєктування холодильної установки траулера Gunnar Langva ми використовуємо обраний раніше холодоагент аміак (R-717). Розрахунок ведеться для одного RSW-танка з необхідною проєктною холодопродуктивністю $Q_0 = 241$ кВт. Нижче наведено теоретичне обґрунтування, побудову циклу та його повний термодинамічний розрахунок.

Вихідні дані для розрахунку:

- Температура кипіння: $t_0 = -7$ °С ($P_0 = 3,33$ бар).
- Температура конденсації: $t_k = 40$ °С ($P_k = 15,55$ бар).
- Перегрів пари у випарнику: $\Delta t_{\text{пер}} = 5$ К.
- Переохолодження рідини в конденсаторі: $\Delta t_{\text{по}} = 2$ К.

Визначення параметрів вузлових точок циклу.

На основі термодинамічних таблиць R-717 та p-h діаграми визначимо основні параметри (тиск P , температура t , ентальпія h , питомий об'єм ν):

Таблиця 3.1. Термодинамічні параметри точок циклу.

Точка	Опис стану	P , МПа	t , °C	h , кДж/кг	s , кДж/(кг·К)	ν , м³/кг
1	Всмоктування (перегріта пара)	0,333	-2	1460	5,62	0,378
2	Нагнітання (ізоентропне стиснення)	1,555	+107	1730	5,62	0,115
3	Перед дроселем (рідина)	1,555	+40	372	—	—
4	Вхід у випарник (суміш)	0,333	-7	372	—	—

Питомі характеристики холодильного циклу

Питома масова холодопродуктивність, кДж/кг

Визначає кількість холоду, яку виробляє 1 кг аміаку.

$$q_0 = h_1 - h_2 = 1460 - 372 = 1088 \text{ кДж/кг}$$

Питома робота стиснення в компресорі (l):

Енергія, необхідна для стиснення пари в компресорі.

$$l = h_2 - h_1 = 1730 - 1460 = 270 \text{ кДж/кг}$$

Питоме теплове навантаження на конденсатор (q_k):

Кількість теплоти, що відводиться забортною водою.

$$q_k = h_2 - h_3 = 1730 - 372 = 1358 \text{ кДж/кг}$$

Для проєктної холодопродуктивності $Q_0 = 241$ кВт розрахуємо основні показники установки:

Масова витрата холодоагенту ($\dot{m}$):

$$\dot{m} = \frac{Q_0}{q_0} = \frac{241}{1088} \approx 0,222 \text{ кг/с}$$

Об'ємна продуктивність компресора при всмоктуванні (V_s):

$$V_s = \dot{m} \cdot v_1 = 0,222 \cdot 0,378 \approx 0,0837 \text{ м}^3/\text{с} \text{ (301,4 м}^3/\text{год)}$$

Теоретична (адіабатна) потужність стиснення (N_a):

$$N_a = \dot{m} \cdot l = 0,222 \cdot 270 \approx 59,8 \text{ кВт}$$

Холодильний коефіцієнт циклу (ε):

$$\varepsilon = \frac{q_0}{l} = \frac{1088}{270} \approx 4,03$$

Розрахований холодильний коефіцієнт ($\varepsilon = 4,03$) свідчить про високу енергоефективність аміачної установки в режимі RSW. Однак слід звернути увагу на високу температуру в кінці стиснення ($t_2 = 125 \text{ }^\circ\text{C}$). Це вимагає використання компресорів зі спеціальною системою охолодження мастила (маслоохолоджувачів), щоб запобігти втраті мастильних властивостей та перегріву вузлів тертя.

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

Поршневий компресор – це об'ємна машина, у якій стиснення пари холодоагенту відбувається внаслідок зменшення об'єму робочої камери при зворотно-поступальному русі поршня. Попри активну експансію гвинтових та спіральних агрегатів, поршневі компресори залишаються «фундаментом» холодильної індустрії завдяки своїй надійності, високому ступеню стиснення та здатності працювати в широкому діапазоні температур кипіння.

У парокомпресійному циклі компресор виконує дві критичні функції:

1. Підтримання низького тиску у випарнику для забезпечення кипіння холодоагенту при заданій температурі.
2. Стиснення пари до тиску конденсації, що дозволяє відводити тепло в навколишнє середовище.

					КРБ.142.4257.01.05.ПЗ.03	Арк.
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		36

Для систематизації парку компресорів, які використовуються в сучасних холодильних установках, застосовують кілька критеріїв:

За ступенем герметизації:

– Відкриті (сальникові): Електродвигун розташований зовні та з'єднаний з валом компресора через муфту або ремінну передачу. Потребують надійного ущільнення (сальника) вала. Використовуються переважно у великих промислових системах та на судах.

– Безсальникові (напівгерметичні): Електродвигун і компресор розміщені в єдиному розбірному корпусі. Охолодження двигуна зазвичай здійснюється парами холодоагенту, що всмоктуються. Це «золотий стандарт» для комерційного холоду.

– Герметичні: Електродвигун і компресорний вузол запаяні в сталевий кожух. Не підлягають ремонту в польових умовах, але мають найвищий рівень герметичності.

За кількістю ступенів стиснення:

1. Одноступеневі: Для систем з невеликим температурним напором.
2. Двоступеневі: Використовуються при високих ступенях стиснення ($p/p_0 > 8 \dots 10$), що характерно для низькотемпературного заморожування.

Основні вузли компресора включають блок-картер, циліндри, поршні з кільцями, колінчастий вал, шатуни та клапанні групи.

Робочий процес

Цикл складається з чотирьох основних фаз, які можна описати через зміну об'єму V та тиску p :

1. Зворотне розширення: Пара, що залишилася у «мертвому просторі», розширюється до тиску всмоктування.
2. Всмоктування: Відкриття всмоктувального клапана та заповнення циліндра.
3. Стиснення: Обидва клапани закриті, поршень рухається до ВМТ (верхньої мертвої точки).

					КРБ.142.4257.01.05.ПЗ.03	Арк.
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		37

4. Нагнітання: Відкриття нагнітального клапана та виштовхування пари в конденсатор.

Наявність шкідливого (мертвого) об'єму V_{dead} є конструктивною необхідністю для запобігання удару поршня об клапанну дошку, проте він знижує об'ємну продуктивність компресора.

Показники ефективності та термодинамічні основи

Для оцінки роботи компресора використовують теоретичну та дійсну продуктивність. Теоретична об'ємна продуктивність (V_h) визначається за формулою $[m^3/c]$:

$$V_h = \frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot S \cdot z \cdot n$$

де:

- D — діаметр циліндра;
- S — хід поршня;
- z — кількість циліндрів;
- n — частота обертання вала.

Коефіцієнт подачі (об'ємний ККД)

Дійсна продуктивність V завжди менша за теоретичну через вплив об'ємних втрат:

$$\lambda = \frac{V}{V_h} = \lambda_v \cdot \lambda_w \cdot \lambda_{ph} \cdot \lambda_{leak}$$

де:

λ_v — об'ємний коефіцієнт (вплив мертвого простору);

λ_w — стінковий коефіцієнт (підігрів пари від стінок);

λ_{ph} — коефіцієнт опору клапанів;

λ_{leak} — втрати через нещільність.

Поршневі компресори чутливі до певних режимів роботи, що вимагає встановлення систем захисту:

					КРБ.142.4257.01.05.ПЗ.03	Арк.
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		38

1. **Гідроудар:** Потрапляння рідкого холодоагенту в циліндр. Оскільки рідина нестислива, це призводить до руйнування клапанів або шатунів. Для захисту використовують відділювачі рідини та підігрів картеру.

2. **Масильна система:** Забезпечує змащування тертьових поверхонь та відведення тепла. Важливо підтримувати повернення мастила з системи (особливо в схемах з масловідділювачами).

3. **Тепловий захист:** Вбудовані термістори в обмотках двигуна та датчики температури нагнітання.

Незважаючи на солідний вік технології, поршневі компресори еволюціонують у наступних напрямках:

- Частотне регулювання (Inverter Drive). Дозволяє плавно змінювати продуктивність, що значно підвищує сезонну енергоефективність (SEER/SCOP).

- Робота з природними холодоагентами. Розробка спеціальних серій для CO₂ (R744) у транскритичних циклах та аміаку (R717). Компресори на CO₂ проєктуються на значно вищий тиск (до 120-140 бар).

- Електронне керування. Інтеграція модулів діагностики (наприклад, CoreSense), які в реальному часі аналізують стан компресора та запобігають аваріям.

- Удосконалення клапанних вузлів. Використання нових композитних матеріалів для зменшення інерційності та шуму.

Для підбору обладнання під задану проєктну холодопродуктивність 241 кВт та обраний холодоагент R-717 (Аміак) найкраще підходить сучасна лінійка поршневих компресорів від компанії GEA. Зокрема, серія GEA Grasso V спеціально розроблена для промислового холоду та морського виконання, вирізняючись високою надійністю та низькими експлуатаційними витратами.

Виходячи з результатів термодинамічного розрахунку, необхідна об'ємна продуктивність компресора при всмоктуванні становить $V_s =$

					КРБ.142.4257.01.05.ПЗ.03	Арк.
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		39

301,4 м³/год (для теоретичного циклу). При виборі реального компресора необхідно врахувати коефіцієнт подачі λ , який враховує об'ємні та енергетичні втрати.

Для забезпечення холодопродуктивності 241 кВт обираємо 6-циліндровий одноступеневий компресор **GEA Grasso V 450**.



Рис. 3.2. Загальний вигляд 6-циліндрового одноступеневого компресора GEA Grasso V 450 [7]

Технічні характеристики обраного компресора (при 1500 об/хв):

- Кількість циліндрів: 6 шт.
- Описаний об'єм (Swept volume) V_h : 435 м³/год.
- Діаметр циліндра / хід поршня: 110/85 мм.
- Максимально допустимий тиск: 28 бар.
- Маса агрегату: 751 кг.

Перевірочний розрахунок продуктивності

Визначення коефіцієнта подачі (λ):

Коефіцієнт подачі для аміачних поршневих компресорів при відношенні тисків $\pi = 4,7$ та вказаних температурах визначається за емпіричною залежністю або графіками виробника. Приймаємо $\lambda = 0,82$.

Дійсна об'ємна продуктивність (V_d):

$$V_d = V_h \cdot \lambda = 365 \cdot 0,82 = 299,3 \text{ м}^3/\text{год}$$

					КРБ.142.4257.01.05.ПЗ.03	Арк.
						40
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

Дійсна масова витрата холодоагенту ($\dot{m}_d$):

$$\dot{m}_d = \frac{V_d}{v_1 \cdot 3600} = \frac{299,3}{0,378 \cdot 3600} \approx 0,220 \text{ кг/с}$$

Дійсна холодопродуктивність (Q_d):

$$Q_d = \dot{m}_d \cdot q_0 = 0,220 \cdot 1088 = 239,4 \text{ кВт}$$

Відхилення від заданої проектної потужності (241 кВт) становить менше 1%, що є допустимим і підтверджує правильність вибору моделі компресора.

Розрахунок споживаної потужності та вибір електродвигуна

Індикаторна потужність (N_i):

Приймаючи індикаторний ККД $\eta_i = 0,85$

$$N_i = \frac{N_a}{\eta_i} = \frac{59,8}{0,85} = 70,35 \text{ кВт}$$

Ефективна потужність на валу (N_e):

Враховуючи механічні втрати (тертя в підшипниках та сальниках), при механічному ККД $\eta_m = 0,95$:

$$N_e = \frac{N_i}{\eta_m} = \frac{70,35}{0,95} = 74,1 \text{ кВт}$$

Вибір електродвигуна:

Потужність двигуна вибирається з коефіцієнтом запасу 1,1 ... 1,15 на випадок пускових навантажень

$$N_d = N_e \cdot 1,15 = 74,1 \cdot 1,15 \approx 85,2 \text{ кВт}$$

Згідно зі стандартним рядом потужностей обираємо трифазний асинхронний електродвигун морського виконання потужністю 90 кВт ($n = 1500$ об/хв).

Для роботи в складі RSW-установки траулера Gunnar Langva обрано компресор GEA Grasso V 450. Він забезпечує необхідну холодопродуктивність 241 кВт при високій енергоефективності. Система автоматики компресора

					КРБ.142.4257.01.05.ПЗ.03	Арк.
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		41

дозволяє плавне регулювання потужності, що важливо для змінного навантаження під час охолодження улову.

Розрахунок та вибір конденсатора

Конденсатор призначений для відведення тепла від перегрітої пари аміаку до заборотної води.

Згідно з термодинамічним розрахунком, теплове навантаження на конденсатор (Q_k):

$$Q_k = \dot{m}_d \cdot (h_2 - h_3) = 0,220 \cdot (1730 - 372) = 300 \text{ кВт}$$

Розрахунок температурного напору:

Температура конденсації $t_k = 40 \text{ }^\circ\text{C}$.

Температура заборотної води: на вході $t_{в1} = 32 \text{ }^\circ\text{C}$, на виході $t_{в2} = 36 \text{ }^\circ\text{C}$ (приймаємо підігрів води $\Delta t_b = 4 \text{ K}$).

Середній логарифмічний температурний напір (ΔT_{ln}):

$$\Delta T_{ln} = \frac{(40 - 32) - (40 - 36)}{\ln \frac{40 - 32}{40 - 36}} \approx 5,77 \text{ K}$$

Визначення площі поверхні теплообміну (F_k):

Приймаємо коефіцієнт теплопередачі для аміачного пластинчастого конденсатора «вода-аміак» $k = 3500 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{K})$.

$$F_k = \frac{Q_k}{k \cdot \Delta T_{ln}} = \frac{300000}{3500 \cdot 5,77} = 14,8 \text{ м}^2$$

Обираємо напівзварний пластинчастий теплообмінник Alfa Laval MK15-BW.

Особливість: аміак циркулює у зварних каналах, а морська вода – у каналах з титановими пластинами та прокладками, що гарантує надійність.

					КРБ.142.4257.01.05.ПЗ.03	Арк.
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		42



Рис. 3.3. Загальний вигляд напівзварного пластинчастого теплообмінника Alfa Laval MK15-BW [9]

Розрахунок та вибір RSW-випарника

Випарник RSW охолоджує морську воду, яка потім циркулює через танки з рибою.

Теплове навантаження (Q_0):

Проектна холодопродуктивність: $Q_0 = 241$ кВт.

Розрахунок температурного напору:

Температура кипіння $t_0 = -7$ °C.

Температура морської води: на вході $t_{w1} = +3$ °C, на виході $t_{w2} = 0$ °C (режим підтримання температури).

					КРБ.142.4257.01.05.ПЗ.03	Арк.
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		43

$$\Delta T_{\ln} = \frac{(3 - (-7)) - (0 - (-7))}{\ln \frac{10}{7}} \approx 8,43 \text{ K}$$

Визначення площі поверхні теплообміну ($F_{\text{вип}}$):

Для затоплених пластинчастих випарників аміаку коефіцієнт теплопередачі $k = 2800 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$.

$$F_{\text{вип}} = \frac{Q_0}{k \cdot \Delta T_{\ln}} = \frac{241000}{2800 \cdot 8,43} = 10,2 \text{ м}^2$$

Обираємо пластинчастий випарник Kelvion (GEA) серії NP100.

Матеріал пластин: Титан (обов'язково для контакту з морською водою).

Конструкція дозволяє легку чистку каналів від біологічного обростання (луски риби, планктону).

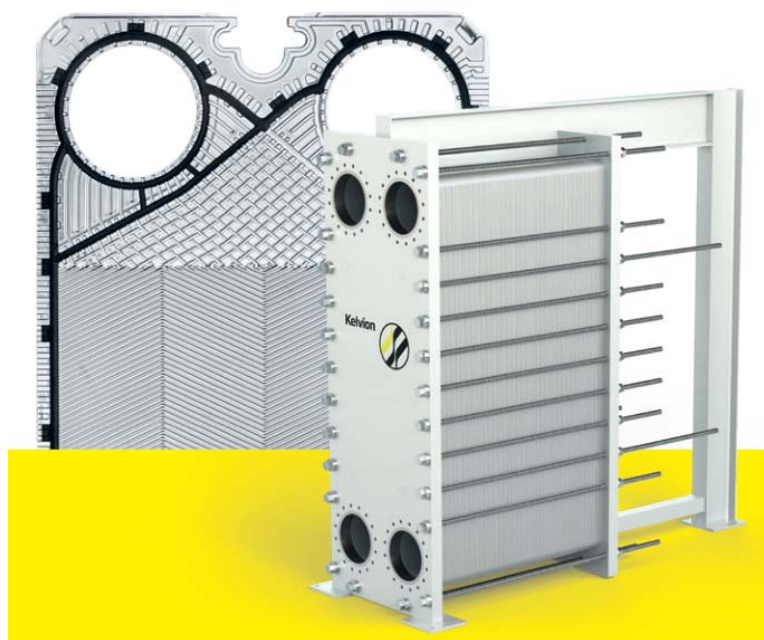


Рис. 3.4. Загальний вигляд пластинчастого випарника Kelvion (GEA) серії NP100 [10]

Розрахунок витрати морської води

Витрата води через випарник (V_w) для охолодження улову:

$$V_w = \frac{Q_0}{c_w \cdot \rho_w (t_{w1} - t_{w2})} = \frac{241}{4,1 \cdot 1025 \cdot 3} \approx 0,019 \text{ м}^3/\text{с}$$

					КРБ.142.4257.01.05.ПЗ.03	Арк.
						44
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

3.3. Розміщення обладнання холодильної установки у приміщенні.

Рациональне розміщення обладнання холодильної установки на пелагічному траулері Gunnar Langva має забезпечувати мінімальну довжину трубопроводів, зручність технічного обслуговування, а також виконання суворих вимог безпеки, пов'язаних із використанням аміаку.

Оскільки холодоагентом є аміак (R-717), усе основне обладнання (компресорний агрегат, конденсатор, ресивер) розміщується в окремому газонепроникному приміщенні (Refrigeration Machinery Room). Це приміщення відокремлене від основного машинного відділення та оснащено:

- незалежною системою аварійної витяжної вентиляції (з 30-кратним обміном повітря);
- системою водяного зрошення (скруббером) для поглинання аміаку у разі витоку;
- двома виходами, один з яких веде безпосередньо на відкриту палубу.

Розміщення основного обладнання

Компресорний агрегат GEA Grasso V 450 встановлюється на спеціальній рамі з використанням віброізолюючих опор для мінімізації передачі вібрацій на корпус судна. Навколо агрегату передбачаються проходи завширшки не менше 0,8–1,0 м для проведення регламентних робіт (заміни мастила, ревізії клапанних плит).

Теплообмінне обладнання (Alfa Laval та Kelvion). Пластинчасті апарати конденсатора та випарника RSW встановлюються вертикально на переборках або спеціальних стійках. Таке розміщення значно економить корисну площу порівняно з кожухотрубними апаратами. Випарник Kelvion монтується в безпосередній близькості до насосів циркуляції морської води, щоб зменшити гідравлічний опір у контурі RSW.

					КРБ.142.4257.01.05.ПЗ.03	Арк.
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		45

Лінійний ресивер розміщується на нижньому рівні під конденсатором для забезпечення самопливу рідкого аміаку. Ресивер кріпиться до фундаменту сталевими ложементами з прокладками, що запобігають контактній корозії.

Трасування трубопроводів виконується з урахуванням теплових розширень. Магістралі всмоктування (холодна сторона) покриваються вологонепроникною ізоляцією з пінополіуретану або спіненого каучуку із захисним шаром з оцинкованої сталі.

Масловіддільник встановлюється безпосередньо за компресором на лінії нагнітання.

Щит керування та автоматики виноситься в окрему газонепроникну зону або монтується біля входу в рефрижераторне відділення з можливістю дистанційної зупинки установки.

На траулері Gunnar Langva танки RSW розташовані поблизу рефрижераторного відділення. Це дозволяє скоротити довжину ізольованих трубопроводів великого діаметру, через які прокачується охолоджена морська вода. Насосна група RSW розміщується так, щоб забезпечити зручний доступ до фільтрів грубої очистки (для видалення луски та залишків улову), які потребують часті промивки під час промислу.

Обране компонування обладнання в окремому приміщенні забезпечує найвищий рівень безпеки для екіпажу судна. Використання компактних пластинчастих теплообмінників дозволило звільнити площу для допоміжних систем енергозабезпечення, а раціональне розміщення вузлів автоматики гарантує оперативне керування установкою в умовах інтенсивного вилову.

3.4. Висновки за розділом 3.

У третьому розділі було виконано повний цикл проєктування холодильної машини для пелагічного траулера Gunnar Langva, що включав

					КРБ.142.4257.01.05.ПЗ.03	Арк.
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		46

термодинамічні розрахунки, підбір основного обладнання та розробку схеми його розміщення.

1. Побудовано теоретичний цикл одноступеневого стиснення на p-h діаграмі для аміаку (R717). Отриманий холодильний коефіцієнт $\varepsilon = 4,03$ свідчить про високу термодинамічну ефективність системи в режимі охолодження морської води (RSW). Встановлено, що висока температура нагнітання (+125 °C) потребує спеціальних заходів з охолодження мастила компресора.

2. На основі розрахованої об'ємної продуктивності (301,4 м³/год) обрано сучасний поршневий компресор GEA Grasso V 450. Перевірочний розрахунок підтвердив, що його дійсна холодопродуктивність (239,36 кВт) повністю відповідає проєктному завданню з мінімальним відхиленням (< 1%). Для приводу підібрано електродвигун морського виконання потужністю 90 кВт.

3. Замість громіздких кожухотрубних апаратів обрано напівзварні пластинчасті теплообмінники – конденсатор Alfa Laval MK15-BW та RSW-випарник Kelvion NP100. Використання титанових пластин гарантує довговічність обладнання в умовах постійного контакту з агресивною морською водою.

4. Проєктом передбачено розміщення установки в окремому газонепроникному приміщенні. Таке рішення, разом із використанням компактних пластинчастих апаратів, дозволило оптимізувати простір машинного відділення та забезпечити відповідність міжнародним стандартам безпеки мореплавства.

					КРБ.142.4257.01.05.ПЗ.03	Арк.
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		47

					КРБ.142.4257.01.05.ПЗ.04		
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	Розділ 4		
Студент		Акулов О.С.					
Керівник		Кобалава Г.О.					
Консульт.							
Зав.каф.		Кобалава Г.О.			ХННІ НУК 48		

РОЗДІЛ 4. АВТОМАТИЗАЦІЯ ТА СПЕЦИФІКАЦІЯ ОБЛАДНАННЯ СХУ

4.1. Вибір та розрахунок лінійної автоматики.

Автоматизація холодильної установки на судах пелагічного промислу має забезпечувати надійну роботу в умовах значних коливань теплового навантаження (від пікового охолодження улову до режиму зберігання).

Для аміачного контуру ми обираємо продукцію компанії Danfoss, яка є світовим лідером у судновому рефрижераторі. Замість механічного TRV (типу TEA), ми встановлюємо імпульсний електронний розширювальний клапан (ERV) серії AKVA.

Переваги ERV AKVA для проєкту:

- Підтримує мінімальний стабільний перегрів (MSS), що дозволяє випарнику працювати з максимальною ефективністю.
- Виконаний повністю з нержавіючої сталі, що критично для аміаку (R717).
- Виконує роль як регулювального, так і соленоїдного клапана (герметично закривається при зупинці).

Технічний підбір моделі

Для підбору використовуємо розраховані параметри:

- Холодоагент: R-717 (Аміак).
- Холодопродуктивність: $Q_0 = 241$ кВт.
- Температура кипіння: $t_0 = -7$ °С.
- Температура конденсації: $t_k = +40$ °С.
- Перепад тиску на клапані: $\Delta P = P_k - P_0 = 15,55 - 3,33 = 12,22$ бар.

Згідно з номограмами виробника, при $\Delta P = 12$ бар та потужності 241 кВт, обираємо клапан: **Danfoss AKVA 20-4**

- Номінальна продуктивність (R717): 315 кВт (забезпечує необхідний запас потужності $\approx 30\%$).

					КРБ.142.4257.01.05.ПЗ.04	Арк.
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		49

- Тип з'єднання: Під зварювання (DIN).
- Матеріал корпусу: Нержавіюча сталь.



Рис. 4.1. Загальний вигляд ЕРВ Danfoss AKVA 20-4

Система керування вентилем

Для роботи ЕРВ необхідний комплект автоматики, який ми включаємо в специфікацію:

1. Контролер перегріву. Danfoss ЕКС 315А. Він отримує сигнали від датчиків і керує ступенем відкриття АКВА.
2. Датчик тиску. Danfoss АКС 33 (встановлюється на виході з випарника).
3. Датчик температури. Danfoss АКС 11 (Pt 1000, встановлюється на трубопроводі всмоктування).

Оскільки використовується аміак (R-717) та поршневий компресор GEA Grasso, особливу увагу слід приділити системі відділення мастила та зберігання холодоагенту. Аміак практично не змішується з мастилом, тому наявність ефективного масловіддільника є критичною для чистоти поверхонь пластинчастого випарника Kelvion.

Підбір допоміжних апаратів та лінійної арматури

Масловіддільник (Oil Separator)

Для поршневих компресорів GEA Grasso серії V обираємо високоефективний масловіддільник промислового типу.

					КРБ.142.4257.01.05.ПЗ.04	Арк.
						50
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

- Функція: вловлювання крапель мастила з нагнітальних парів аміаку та повернення їх у картер компресора.
- Вибір моделі: Обираємо вертикальний масловіддільник Danfoss OUB 4.
- Обґрунтування: він забезпечує ступінь очищення до 99%, що мінімізує потрапляння мастила в RSW-випарник. Це дозволяє підтримувати високий коефіцієнт теплопередачі протягом усього терміну експлуатації.

Лінійний ресивер (Liquid Receiver)

Ресивер необхідний для збору рідкого аміаку після конденсатора та компенсації змін об'єму рідини в системі при різних режимах роботи RSW-танків.

- Розрахунок об'єму: Загальна заправка системи аміаком для одного танка становить близько 80-100 кг. Згідно з правилами реєстру, ресивер повинен вміщувати всю заправку при заповненні на 80%.
- Вибір моделі: Обираємо сталевий горизонтальний ресивер об'ємом 120 літрів.
- Комплектація: ресивер обов'язково оснащується візуальним показником рівня (скло Клінгера) та двома запобіжними клапанами через перемикаючий пристрій.

Запірна та захисна арматура (Danfoss SVL Flexline)

Для аміачного контуру судна Gunnar Langva ми використовуємо універсальну серію клапанів **Danfoss SVL**, виготовлених з низькотемпературної сталі.

1. Запірні клапани (SVA-S/L): Встановлюються на вході та виході кожного апарата для можливості проведення сервісних робіт.
2. Зворотні клапани (CHV-X): Встановлюються на лінії нагнітання після компресора, щоб запобігти перетіканню холодоагенту в компресор під час стоянки.

					КРБ.142.4257.01.05.ПЗ.04	Арк.
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		51

3. Фільтри (SCA-X): Встановлюються на лінії всмоктування для захисту поршневої групи компресора від механічних домішок та окалини.

Запобіжні клапани (Safety Valves)

Згідно з вимогами безпеки для аміачних установок, кожен апарат (конденсатор, випарник, ресивер) повинен мати захист від перевищення тиску.

- Модель: Danfoss SFV 20.
- Налаштування: Тиск спрацювання $P_{set} = 25$ бар (відповідно до розрахункового тиску компонентів).

4.2. Система автоматичного захисту та контролю.

Для компресора **GEA Grasso V 450** передбачаємо наступні пристрої захисту:

- Комбіноване реле тиску (Пресостат): Danfoss KP 15. Захищає компресор від надто низького тиску всмоктування (вакууму) та надто високого тиску нагнітання.
- Датчик різниці тиску мастила: Danfoss MP 55. Зупиняє компресор, якщо тиск у системі змащування падає нижче критичного рівня.
- Термостат нагнітання: Враховуючи, що для аміаку температура нагнітання висока ($+125\text{ }^{\circ}\text{C}$), встановлюємо датчик, який вимкне двигун при перевищенні $+135\text{ }^{\circ}\text{C}$.

4.3. Специфікація основного обладнання та засобів автоматизації.

У таблиці нижче зведено основні технічні одиниці, що були підібрані для забезпечення роботи холодильної установки траулера Gunnar Langva ($Q_0 = 241$ кВт, R717).

Таблиця 4.1. Специфікація холодильної установки.

					КРБ.142.4257.01.05.ПЗ.04	Арк.
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		52

№ п/п	Найменування обладнання	Марка / Модель	Основні характеристики	Кількість
1	Компресорний агрегат	GEA Grasso V 450	Поршневий, 1500 об/хв, 4 цил.	1
2	Електродвигун компресора	AIP (морське вик.)	$N = 90$ кВт, 380 В, 50 Гц	1
3	Конденсатор пластинчастий	Alfa Laval MK15-BW	Напівзварний, титанові пластини	1
4	Випарник RSW	Kelvion NP100	Напівзварний, титанові пластини	1
5	Ресивер лінійний	Проектний (сталь)	Горизонтальний, $V = 120$ л	1
6	Масловіддільник	Danfoss OUB 4	Ефективність 99%, для аміаку	1
7	Електронний розширювальний вентиль	Danfoss AKVA 20-4	Нержавіюча сталь, R717	1
8	Контролер перегріву	Danfoss EKC 315A	Керування імпульсним ЕРВ	1
9	Датчик тиску / температури	AKS 33 / AKS 11	4-20 мА / Pt 1000	1/1
10	Блок запірної арматури	Danfoss SVL Flexline	Зварні з'єднання, сталь	компл.
11	Комбінований пресостат	Danfoss KP 15	Захист по P_s та P_d	1
12	Запобіжний клапан	Danfoss SFV 20	Тиск спрацювання 25 бар	2

4.4. Висновки по розділу 4

У процесі виконання четвертого розділу було розроблено систему автоматизації та проведено повну комплектацію суднової холодильної установки допоміжним обладнанням. За результатами розділу можна зробити наступні висновки:

1. Забезпечено високу енергоефективність: використання електронного розширювального вентиля Danfoss AKVA у поєднанні з контролером ЕКС 315А дозволяє підтримувати мінімальний стабільний перегрів у випарнику. Це підвищує ККД установки на 10-15% порівняно з механічними ТРВ.

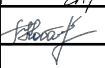
					КРБ.142.4257.01.05.ПЗ.04	Арк.
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		53

2. Реалізовано надійний захист: підібрана система автоматики (пресостати КР 15, датчики різниці тиску мастила МР 55) гарантує аварійне відключення компресора GEA Grasso при порушенні робочих режимів, що критично важливо в умовах автономного плавання.

3. Оптимізовано допоміжну лінію: вибір вертикального масловіддільника високої ефективності та лінійного ресивера на 120 літрів забезпечує чистоту теплообмінних поверхонь та стабільну подачу холодоагенту при різких змінах теплового навантаження під час прийому улову.

4. Враховано специфіку аміаку: вся обрана лінійна арматура та прилади автоматики (серія Flexline) виготовлені з корозійностійкої сталі без використання мідних сплавів, що забезпечує довговічність системи в агресивному аміачному та морському середовищах.

					КРБ.142.4257.01.05.ПЗ.04	Арк.
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		54

					КРБ.142.4257.01.05.ПЗ.05		
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	Розділ 5		
Студент		Акулов О.С.					
Керівник		Кобалава Г.О.					
Консульт.							
Зав.каф.		Кобалава Г.О.			ХННІ НУК 55		

РОЗДІЛ 5. ОХОРОНА ПРАЦІ

5.1. Аналіз небезпек в машинному відділенні на рефрижераторних суднах.

Машинно-котельне відділення (МКВ) та аміачна вигородка пелагічного траулера Gunnar Langva характеризуються високою концентрацією енергетичного обладнання на обмеженій площі. Специфіка роботи рефрижераторного механіка полягає у необхідності обслуговування систем, що знаходяться під високим тиском, мають екстремальні температури та використовують токсичні робочі тіла.

Фізичні небезпечні та шкідливі фактори

1. Шум та вібрація. Джерелом інтенсивного широкосмугового шуму є поршневий компресор GEA Grasso V 450 (рівень звукового тиску може сягати 85–95 дБА) та допоміжні дизель-генератори. Постійний вплив шуму призводить до втоми екіпажу, зниження уваги та ризику виникнення професійної туговухості. Вібрація від працюючих агрегатів впливає на опорно-руховий апарат та може спричинити розгерметизацію трубопроводів СХУ.

2. Підвищена температура поверхонь обладнання. Трубопроводи нагнітання аміаку мають температуру до +125 °С. Контакт із незахищеними ділянками труб або циліндрами компресора призводить до термічних опіків.

3. Електрична небезпека. Живлення електродвигуна компресора потужністю 90 кВт здійснюється напругою 380 В. Умовами, що підвищують ризик ураження струмом, є висока вологість повітря, наявність струмопровідного пилу та металевих підлог (корпус судна), що потребує надійної системи заземлення.

4. Рухомі частини механізмів. Відкриті вали, муфти зчеплення та лопаті вентиляторів конденсаторів створюють ризик механічного травмування

					КРБ.142.4257.01.05.ПЗ.05	Арк.
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		56

(захоплення одягу або кінцівок) при недотриманні правил огороження та блокування.

Хімічні небезпечні фактори

Основним джерелом хімічної небезпеки в нашому проєкті є **Аміак (R-717)**.

1. Токсичність. Навіть у малих концентраціях аміак подразнює слизові оболонки очей та дихальних шляхів. При високих концентраціях виникає набряк легенів та параліч дихання.

2. Вибухонебезпечність. Аміак утворює вибухонебезпечні суміші з повітрям при концентрації 15–28% за об'ємом. Наявність у системі холодильного мастила знижує нижню межу вибуховості.

3. Хімічні опіки. Потрапляння рідкого аміаку на шкіру спричиняє глибокі термічні опіки внаслідок інтенсивного випаровування та одночасної хімічної агресії.

Психофізіологічні фактори та середовище

1. Обмеженість простору. Компонування обладнання в аміачній вигородці траулера Gunnar Langva є дуже щільним. Це ускладнює евакуацію при аваріях та робить технічне обслуговування травмонебезпечним.

2. Недостатнє освітлення. В окремих зонах під пайолами або за габаритними теплообмінниками освітленість може бути нижчою за норму (менше 150 лк), що підвищує ризик помилкових дій персоналу.

3. Слизькі поверхні. Можливі витоки мастила або конденсату на сталеві решітки підлоги (пайоли) створюють небезпеку падіння.

Небезпека роботи під тиском

Вся холодильна установка є системою, що працює під тиском до 1,6 МПа (на стороні нагнітання). Раптове руйнування фланцевих з'єднань, корозійне пошкодження стінок ресивера або випарника Kelvion може призвести до вибухоподібного розширення газу та масивного викиду аміаку в приміщення.

					КРБ.142.4257.01.05.ПЗ.05	Арк.
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		57

5.2. Заходи безпеки при роботі з R-717.

Використання аміаку (R-717) на траулері Gunnar Langva вимагає впровадження суворих інженерних та організаційних заходів безпеки. Аміак має різкий характерний запах, що є «природним індикатором» витоку, проте при високих концентраціях він стає смертельно небезпечним.

Технічні та конструктивні заходи захисту

1. Ізоляція обладнання (Аміачна вигородка). Усі компоненти АХУ (компресор GEA Grasso, ресивери, насоси) розміщуються в автономному, газонепроникному приміщенні. Двері у вигородку повинні відчинятися назовні та бути самозакривними.

2. Система аварійної вентиляції. Приміщення обладнується незалежною витяжною вентиляцією, що забезпечує не менше 30 повних обмінів повітря на годину. Пускові кнопки вентиляції розташовуються як всередині, так і ззовні приміщення.

3. Аварійне водяне зрошення. Оскільки аміак надзвичайно добре розчиняється у воді (1:700), над компресорним агрегатом та біля виходів встановлюються дренчерні розпилювачі. Водяна завіса дозволяє осаджувати аміачну хмару, запобігаючи її поширенню по судну.

4. Запобіжні пристрої. Кожна посудина під тиском (ресивер, конденсатор Alfa Laval) захищена дублюючими запобіжними клапанами Danfoss SFV 20, які з'єднані з магістраллю аварійного викиду газу за борт або у спеціальний бак-поглинач.

Система контролю загазованості

Автоматична система виявлення витоків аміаку повинна працювати безперервно та мати три пороги спрацювання:

– Поріг 1 (50 мг/м³), вмикається світлозвукова сигналізація в рефрижераторному відділенні та на ходовому містку.

– Поріг 2 (500 мг/м³), автоматично вмикається аварійна витяжна вентиляція.

					КРБ.142.4257.01.05.ПЗ.05	Арк.
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		58

– Поріг 3 (понад 500 мг/м³), відбувається повне знеструмлення обладнання (крім аварійного освітлення та вентиляції) і зупинка компресорів.

Засоби індивідуального захисту (ЗІЗ)

Біля входу в аміачну вигородку у спеціальних шафах повинні зберігатися:

– Ізолюючі дихальні апарати на стисненому повітрі (не менше двох комплектів) з часом захисної дії не менше 30 хв.

– Фільтруючі протигази з коробками марки «КД» (сірого кольору), які захищають від аміаку та сірководню.

– Газонепроникні захисні костюми (наприклад, типу «Треллкем»), що захищають шкіру від хімічних опіків.

– Гумові рукавички та чоботи, стійкі до лужного середовища.

Правила експлуатації та обслуговування

1. Заправка системи. Забороняється заправляти аміак безпосередньо з балонів у компресор. Заправка проводиться тільки через рідинну лінію ресивера з використанням армованих шлангів.

2. Видалення повітря та масла. Повітря з системи видаляється через спеціальний апарати-деаратори. Масло з масловіддільників повинно зливатися регулярно, оскільки його накопичення в теплообмінниках Kelvion знижує ефективність та підвищує ризик вибуху аміачно-масляної суміші.

3. Вогневі роботи. Будь-які зварювальні роботи в аміачній вигородці дозволяються лише після повної евакуації холодоагенту та продування системи інертним газом (азотом).

Перша медична допомога при ураженні аміаком

– При потраплянні на шкіру, негайно промивати уражену ділянку великою кількістю чистої води протягом 15–20 хвилин. Не використовувати мазі чи олії.

– При потраплянні в очі, промивати очі водою або 2% розчином борної кислоти.

					КРБ.142.4257.01.05.ПЗ.05	Арк.
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		59

– При вдиханні, винести потерпілого на свіже повітря, забезпечити спокій та тепло. При спазмах горла – вдихання парів лимонної чи оцтової кислоти.

5.3. Висновки за розділом 5.

Проведений аналіз безпеки життєдіяльності в машинному відділенні траулера Gunnar Langva дозволив визначити основні зони ризику. Впровадження системи автоматичного газового моніторингу та суворе доотримання регламенту технічного обслуговування компресорного агрегату GEA Grasso дозволяють звести ймовірність аварійних ситуацій до мінімуму. Розроблені заходи відповідають міжнародним вимогам охорони праці на судах рефрижераторного флоту.

					КРБ.142.4257.01.05.ПЗ.05	Арк.
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		60

ВИСНОВКИ

1) У кваліфікаційній роботі розроблено проєкт суднової холодильної установки для RSW-танків пелагічного траулера Gunnar Langva дедвейтом 1970 т.

2) На основі аналізу району плавання та характеристик судна встановлено розрахункові умови експлуатації для тропічного клімату ($t_{\text{зовн}} = +35\text{ }^{\circ}\text{C}$, $t_{\text{вн}} = +32\text{ }^{\circ}\text{C}$). Це дозволило спроектувати систему з необхідним запасом надійності для роботи у будь-якому районі Світового океану.

3) Проведено розрахунок теплоприпливів, який показав, що сумарна необхідна холодопродуктивність для одного танка становить 241 кВт. Встановлено, що понад 90% енергії витрачається на охолодження свіжовиловленої риби, що підтверджує пріоритетність режиму «pull-down» для суден пелагічного промислу.

4) Шляхом порівняльного аналізу доведено перевагу використання природного холодоагенту Аміаку (R-717). Він забезпечує високий холодильний коефіцієнт ($\epsilon = 4,03$), що на 25-29% вище за сучасні холодоагенти, та має нульовий потенціал глобального потепління ($\text{GWP} = 0$), відповідаючи екологічним вимогам 2026 року.

5) Для реалізації холодильного циклу обрано поршневий компресор GEA Grasso V 450 та напівзварні пластинчасті теплообмінники компаній Alfa Laval та Kelvion. Використання титанових пластин у конструкції теплообмінників гарантує корозійну стійкість в агресивному морському середовищі та компактність установки.

6) Проєкт передбачає використання електронної системи регулювання на базі вентилів Danfoss AKVA та мікропроцесорних контролерів. Це дозволяє точно підтримувати параметри охолодження та знижує енерговитрати судна на 10-15% шляхом оптимізації роботи випарника.

7) Розроблено комплекс заходів з охорони праці, що враховує специфіку роботи з аміаком. Проєктування окремого аміачного приміщення з

Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата

КРБ.142.4257.01.05.ПЗ.00

Арк.

аварійною вентиляцією та системою водяного зрошення мінімізує ризики для екіпажу та відповідає міжнародним стандартам безпеки мореплавства.

					КРБ.142.4257.01.05.ПЗ.00	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. 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).
7. Grasso V 700 Specifications. GEA Refrigeration Netherlands N.V. URL: https://www.hosbv.com/data/specifications/17935_Grasso%20V%20700%20Specifications.pdf.
8. Danfoss. Application Guide: Electronic expansion valves type AKVA. Danfoss, 2024.
9. Alfa Laval. Semi-welded plate heat exchangers for industrial refrigeration. Product catalogue. Alfa Laval, 2023.
10. Kelvion. RSW Evaporators for Marine Applications: Titanium Plate Heat Exchangers. Technical Data. Kelvion, 2024.

					КРБ.142.4257.01.05.ПЗ.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		63

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

12. 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.

13. 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.

14. Гапонов С. А. Проєктування 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.

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

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

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

					КРБ.142.4257.01.05.ПЗ.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		64

ДОДАТОК

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