

Міністерство освіти і науки України
Одеський національний технологічний університет
Кафедра холодильних установок і кондиціювання повітря



**ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА
ДО КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ**

на тему: Проект енергоефективної системи холодопостачання супермаркету
в м.Одеса на базі CO₂-бустерної установки з утилізацією теплоти

Здобувача

Псіліца Р.В

4 курсу

ЕН-141 групи

Керівник

к.т.н., доц. Трандафілов В.В.

Консультанти:

д.т.н, проф. Хмельнюк М.Г.

Кваліфікаційна робота допускається до захисту

Рішення кафедри від

28.05.2026 р.

протокол № 10

Завідувач кафедри ХУКП

Михайло ХМЕЛЬНЮК

Одеса - 2026 рік

ОДЕСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНОЛОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Інститут	Холоду, кріотехнологій та екоенергетики ім. В.С. Мартиновського
Кафедра	Холодильних установок і кондиціонування повітря
Ступінь вищої освіти	Бакалавр
Спеціальність	142 Енергетичне машинобудування
Освітня програма	Холодильні машини, установки і кондиціонування повітря

ЗАТВЕРДЖУЮ
Зав. кафедри д.т.н., проф. Хмельнюк М.Г.

«16» березня 2026 року

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ ЗДОБУВАЧА

Псіліца Ростислав Вікторович

1. Тема роботи	Проект енергоефективної системи холодопостачання супермаркету в м.Одеса на базі CO ₂ -бустерної установки з утилізацією теплоти
----------------	--

Затверджена наказом ОНТУ від	26.09.2025 р.	наказ	№ 499-03
------------------------------	---------------	-------	----------

2. Термін здачі здобувачем закінченої роботи	28.05.2026 р.
--	---------------

3. Вихідні дані роботи
Супермаркет розташований у м. Одеса.
Бустерна установка CO ₂ з утилізацією тепла

4. Перелік питань, які потрібно розробити
Реферат, 1. Вступ, 1. .План супермаркету торгова площа 235–255 м ² , кліматичні умови м. Одеса, сучасні вимоги F-Gas Regulation та ДБН В.2.5-20:2018

2.Перелік питань, які підлягають розробці:

3 Аналіз сучасних тенденцій розвитку комерційного холодопостачання та властивостей холодоагенту R744

4. Розрахунок холодових навантажень об'єкта.
- 5.Розробка принципової схеми транскритичної CO₂-бустерної системи з утилізацією тепла.
6. Підбір основного обладнання та автоматики.
- 7.Гідравлічний розрахунок трубопроводів і заходи безпеки.
- 8.Техніко-економічна та екологічна оцінка проєкту (NPV, IRR).

План розміщення обладнання

Графіки холодових навантажень і річного профілю

Результати техніко-економічного аналізу

Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)

Презентація в PowerPoint

6. Консультанти по роботі, із зазначенням розділів роботи, що стосуються їх

Розділ	Консультант	Підпис, дата	
		Завдання видав	Завдання видав
Охорона праці	д.т.н., проф. Хмельнюк М.Г.	18.05.2026	22.05.2026

7. Дата видачі завдання 16.03.2026 р.

Керівник

Трандафілов В.В.

Завдання прийняв до виконання

Псіліца Р.В

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1.	Вступ	14,02-18,02	Виконано
2.	Розділ 1. Теоретичні основи застосування CO ₂ у системах холодопостачання	28,02-10,03	Виконано
3.	Розділ 2. Аналіз об'єкта та вихідних даних (характеристика супермаркету, клімат Одеси, розрахунок холодових навантажень, річний профіль)	13,03-18,03	Виконано
4.	Розділ 3. Проект транскритичної CO ₂ -бустерної системи з утилізацією тепла (схема, підбір обладнання, газ-кулер, утилізація тепла, автоматика, гідравліка, безпека)	20,03-28,03	Виконано
5.	Розділ 4. Техніко-економічна та екологічна оцінка проекту	30,03-05,04	Виконано
6.	Висновки. Оформлення роботи, список літератури, додатки	8,04-12,04	Виконано
7.	Підготовка презентації, та матеріалу для захисту	18,04-15,05	Виконано

Здобувач – дипломник Псіліца Р.В

Керівник роботи Трандафілов.В.В

Несу відповідальність за ідентичність електронного та друкованого варіантів кваліфікаційної роботи, даю згоду на обробку персональних даних та не заперечую проти розміщення кваліфікаційної роботи на офіційних web-ресурсах ОНТУ.

Підтверджую, що в кваліфікаційній роботі відсутні порушення норм академічної доброчесності.

Здобувач-дипломник Псіліца Ростислав Вікторович

Анотація

У кваліфікаційній роботі розглянуто актуальне питання підвищення енергоефективності та екологічної безпеки систем холодопостачання торговельних підприємств. Об'єктом дослідження є компактний продовольчий супермаркет у м. Одеса (торгова площа 235–255 м² за планом). Предметом дослідження є транскритична CO₂-бустерна холодильна система з утилізацією тепла конденсації. Метою роботи є розробка комплексного проєкту енергоефективної системи холодопостачання супермаркету на базі природного холодоагенту R744 (CO₂) з максимальною утилізацією тепла та виконання його техніко-економічного та екологічного обґрунтування. У роботі виконано: аналіз сучасних тенденцій розвитку комерційного холодопостачання; розрахунок холодових навантажень об'єкта (літнє пікове навантаження 160,8–241,1 кВт); розробку принципової схеми транскритичної CO₂-бустерної системи з паралельним компресором, газ-кулером з адіабатичним зрошенням та системою утилізації тепла; підбір основного обладнання (Bitzer, Güntner, Alfa Laval, Danfoss); гідравлічний розрахунок трубопроводів; автоматизацію системи; техніко-економічну оцінку та екологічний аналіз. Основні результати: середньорічний COP системи становить 3,5–4,2 (на 46–55 % вище, ніж у системах на R404A); річна утилізація тепла — 1550 МВт·год, що дозволяє замінити 162–183 тис. м³ природного газу; річна економія становить 3702–4250 тис. грн; термін окупності додаткових капітальних витрат — 0,15–0,17 року; NPV за 10 років — +23 450–26 850 тис. грн; IRR — 580–660 %; показник TEWI знижено на 24–25 % порівняно з традиційною системою.

Розроблений проєкт підтвердив високу техніко-економічну ефективність та екологічну доцільність застосування транскритичних CO₂-бустерних систем з утилізацією тепла для супермаркетів малого формату в умовах південного регіону України. Система повністю відповідає вимогам F-Gas Regulation, Паризької угоди та національним нормам енергозбереження.

Ключові слова: супермаркет – CO₂ – утилізація тепла.

Abstract

The thesis considers the current issue of increasing the energy efficiency and environmental safety of refrigeration systems of commercial enterprises. The object of the study is a compact food supermarket in Odessa (trading area 235–255 m² according to the). The subject of the study is a transcritical CO₂-booster refrigeration system with condensation heat recovery. The purpose of the work is to develop a comprehensive project for an energy-efficient refrigeration system for a supermarket based on the natural refrigerant R744 (CO₂) with maximum heat recovery and to carry out its feasibility study and environmental justification. The work includes: analysis of current trends in the development of commercial refrigeration; calculation of the facility's refrigeration loads (summer peak load 160.8–241.1 kW); development of a schematic diagram of a transcritical CO₂ booster system with a parallel compressor, a gas cooler with adiabatic irrigation and a heat recovery system; selection of the main equipment (Bitzer, Güntner, Alfa Laval, Danfoss); hydraulic calculation of pipelines; system automation; feasibility study and environmental analysis. Main results: the average annual COP of the system is 3.5–4.2 (46–55% higher than in systems using R404A); annual heat recovery is 1,550 MWh, which allows replacing 162–183 thousand m³ of natural gas; annual savings are 3,702–4,250 thousand UAH; payback period of additional capital costs is 0.15–0.17 years; NPV for 10 years is +23,450–26,850 thousand UAH; IRR is 580–660%; TEWI indicator is reduced by 24–25% compared to the traditional system.

The developed project confirmed the high technical and economic efficiency and environmental feasibility of using transcritical CO₂ booster systems with heat recovery for small-format supermarkets in the southern region of Ukraine. The system fully complies with the requirements of the F-Gas Regulation, the Paris Agreement and national energy saving standards.

Keywords: supermarket – CO₂ – heat recovery.

ЗМІСТ

Вступ	7
Розділ 1. Теоретичні основи застосування CO ₂ у системах холодопостачання	7
1.1. Сучасні тенденції розвитку комерційного холодопостачання	8
1.2. Властивості холодоагенту R744 та його переваги	9
1.3. Транскритичний цикл CO ₂ : особливості та термодинамічний аналіз	10
1.4. Порівняння CO ₂ з фреонами R404A, R507, R448A	11
Розділ 2. Аналіз об'єкта та вихідних даних	12
2.1. Характеристика супермаркету як об'єкта холодопостачання	12
2.2. Клімат Одеси та вплив на режим роботи системи	15
2.3. Розрахунок холодівих навантажень MT та LT	21
2.4. Річний профіль навантаження	25
Розділ 3. Проєкт транскритичної CO ₂ -бустерної системи з утилізацією тепла	28
3.1. Принципова схема системи	28
3.2. Підбір компресорної станції (MT, LT, паралельний компресор)	32
3.3. Газ-кулер з адіабатичним зрошенням	38
3.4. Розрахунок та підбір системи утилізації тепла	43
3.5. Автоматика та управління	48
3.6. Гідравлічний розрахунок трубопроводів	52
3.7. Заходи безпеки та захисту	57
Розділ 4. Техніко-економічна та екологічна оцінка	62
4.1. Порівняння з системою на R404A	62
4.2. Розрахунок економії електроенергії та тепла	66
4.3. Оцінка капітальних та експлуатаційних витрат	69
4.4. Показники ефективності (NPV, IRR, окупність)	73
4.5. Екологічна оцінка	75
Висновки	80
Список використаної літератури	84

					КРБ.ХУКП.1.499-03.1.3			
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата				
Розроб.		Псіліца Р. В.			«Проєкт енергоефективної системи холодопостачання супермаркету в м. Одеса на базі CO ₂ -бустерної установки з утилізацією тепла»	Літ.	Арк.	Акрушів
Перевір.		Грандафілов В. В					6	84
		BVB.B VB				ОНТУ ЕН-141(а)		
Н. Контр.								
Затверд.								

ВСТУП:

Сучасний розвиток роздрібно́ї торгівлі в Україні супроводжується стрімким зростанням вимог до енергоефективності, екологічної безпеки та економічної доцільності систем холодопостачання. Супермаркети та магазини формату «біля дому» є одними з найбільших споживачів електроенергії серед комерційних об'єктів: частка холодильного обладнання в загальному енергоспоживанні може сягати 40–65 %, а в регіонах з теплим кліматом (як південь України) — навіть більше. Водночас традиційні системи на синтетичних фреонах з високим потенціалом глобального потепління (R404A, R507, GWP 3922–3985) підпадають під жорсткі міжнародні обмеження (Регламент ЄС № 517/2014 «F-Gas», Монреальський протокол та його поправки) та поступово виводяться з експлуатації в нових об'єктах. Україна, як підписант Паризької угоди та учасник європейської політики «Green Deal», також посилює вимоги до зниження викидів парникових газів. З 2025 року в ЄС заборонено використання фреонів з $GWP > 150$ у нових стаціонарних системах комерційного холодопостачання потужністю понад 40 кВт. Це створює потужний стимул для переходу на природні холодоагенти, серед яких вуглекислий газ (R744, CO_2) займає провідне місце завдяки поєднанню екологічної безпеки ($GWP = 1$, $ODP = 0$), доступності та можливості реалізувати виско́ефективні транскритичні системи з утилізацією тепла конденсації. Особливо актуальним це питання є для міст з теплим приморським кліматом, таких як Одеса, де середня температура повітря влітку перевищує $+30...+35\text{ }^{\circ}C$ протягом 4–6 місяців на рік. У таких умовах класичні фреонові системи втрачають ефективність, а транскритичні CO_2 -системи з паралельним компресором та обов'язковою утилізацією тепла дозволяють не лише компенсувати падіння COP, але й перетворити холодильну установку на ефективний тепловий насос, що працює цілий рік. За даними Європейської асоціації природних холодоагентів (Shesco, 2024), у країнах ЄС частка супермаркетів з CO_2 -системами перевищила 70–80 % (Німеччина — 85 %, Данія — 95 %, Нідерланди — 90 %). В Україні темпи переходу значно нижчі, але вже понад 150–200 об'єктів (мережі АТБ, Сільпо, Фора, локальні супермаркети) обладнано CO_2 -системами з 2018 року. У південних регіонах, де літнє навантаження максимальне, впровадження транскритичних систем з утилізацією тепла дає найбільший економічний ефект: економія електроенергії 35–50 % та заміщення 60–90 % витрат на опалення та гаряче водопостачання. Саме тому розробка та обґрунтування проєкту енергоефективної системи холодопостачання супермаркету в м. Одеса на базі транскритичної CO_2 -бустерної установки з утилізацією тепла є актуальним науково-прикладним

					КРБ.ХУКП.1.499-03.1.3	Арк.
						7
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

завданням, що відповідає сучасним вимогам сталого розвитку, енергозбереження та екологічної безпеки.

Мета роботи. Метою дипломної роботи є розробка комплексного проекту енергоефективної системи холодопостачання продовольчого супермаркету середньої площі в м. Одеса на базі транскритичної CO₂-бустерної установки з повною утилізацією тепла конденсації, а також його всебічне техніко-економічне та екологічне обґрунтування з урахуванням кліматичних, експлуатаційних та нормативних особливостей регіону. Досягнення поставленої мети передбачає вирішення наступних завдань: Провести аналіз сучасного стану та тенденцій розвитку комерційного холодопостачання в Україні та світі з акцентом на застосування природних холодоагентів, зокрема вуглекислого газу (R744). Вивчити фізико-хімічні, термодинамічні та експлуатаційні властивості холодоагенту R744, особливості транскритичного циклу та порівняти їх з традиційними синтетичними фреонами (R404A, R507, R448A). Виконати детальний аналіз об'єкта дослідження — продовольчого супермаркету в м. Одеса — та розрахувати холодові навантаження середньотемпературного (MT) та низькотемпературного (LT) контурів з урахуванням реальних характеристик торговельного обладнання, кліматичних умов регіону та річного профілю навантаження. Розробити принципову схему системи холодопостачання, підібрати основне обладнання (компресорну станцію, газовий охолоджувач, теплообмінники утилізації, систему автоматики) та розрахувати ключові параметри роботи (тиск, температура, продуктивність, гідравліка). Виконати детальний розрахунок системи утилізації тепла конденсації, оцінити її потенціал та внесок в загальну енергоефективність об'єкта протягом року. Провести техніко-економічну оцінку проекту, включаючи розрахунок капітальних та експлуатаційних витрат, річної економії електроенергії та тепла, терміну окупності, чистої приведеної вартості (NPV), внутрішньої норми прибутковості (IRR) та індексу рентабельності (PI). Оцінити екологічні переваги запропонованого рішення, кількісно визначити зниження викидів парникових газів (прямих та непрямих) порівняно з базовим варіантом на R404A та підтвердити відповідність проекту чинним екологічним нормам України та ЄС. Розробити рекомендації щодо монтажу, пусконаладження, експлуатації, технічного обслуговування та забезпечення безпеки системи високого тиску. Досягнення поставленої мети та виконання перелічених завдань дозволить не лише отримати технічно обґрунтований проєкт системи холодопостачання з високими показниками енергоефективності, але й продемонструвати реальну економічну доцільність та екологічну перевагу переходу на природні холодоагенти в умовах українського ринку роздрібної торгівлі, зокрема в

					КРБ.ХУКП.1.499-03.1.3	Арк.
						8
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

регіонах з теплим кліматом. Метою роботи є не тільки створення конкретного проєкту для обраного об'єкта, але й формування науково обґрунтованого підходу до вибору та впровадження транскритичних CO₂-систем з утилізацією тепла як типового рішення для нових та модернізованих супермаркетів в Україні..

Розділ 1. Теоретичні основи застосування CO₂ у системах холодопостачання

1.1. Сучасні тенденції розвитку комерційного холодопостачання Комерційне холодопостачання (супермаркети, гіпермаркети, магазини формату «біля дому», логістичні центри) є одним з найбільших споживачів електроенергії серед будівель комерційного та громадського призначення. За даними ASHRAE Handbook – Refrigeration (2022) та звіту Міжнародного інституту холодильної техніки (IIR, 2023), частка холодильних систем у загальному енергоспоживанні супермаркетів становить 35–65 %, а в теплих кліматичних регіонах (південь Європи, південь України) — регулярно перевищує 55–70 %. Це пояснюється великою кількістю торговельного обладнання (відкриті шафи, островні гірки, м'ясні/рибні прилавки, морозильні камери), яке працює цілодобово 365 днів на рік. До середини 2010-х років у більшості країн світу, включаючи Україну, домінували системи на синтетичних фреонах групи HFC — R404A (GWP 3922), R507 (GWP 3985), R134a (GWP 1430). Ці холодоагенти забезпечували стабільну роботу в широкому діапазоні температур, але мають катастрофічно високий потенціал глобального потепління та підпадають під жорсткі міжнародні обмеження.

Ключові події, що визначили сучасні тенденції: Монреальський протокол (1987) та його поправки (Кігалійська поправка 2016) — заборона HCFC (R22) та скорочення HFC. Регламент ЄС F-Gas № 517/2014 (з оновленнями 2024) — поступове скорочення HFC на ринку ЄС: з 2020 року заборонено заправку нових систем фреонами з GWP > 2500, з 2025 року — з GWP > 150 для систем потужністю понад 40 кВт у комерційному холодопостачанні. Паризька угода (2015) та національні зобов'язання — Україна зобов'язалася скоротити викиди парникових газів на 65 % до 2030 року порівняно з 1990 роком (НВВ 2021–2025). Закон України «Про охорону атмосферного повітря» (зі змінами 2023–2025) — посилення вимог до використання холодоагентів з низьким GWP. Ці регуляторні зміни спричинили швидкий перехід на природні холодоагенти: R744 (CO₂) — основний вибір для середніх і великих супермаркетів (потужність

					КРБ.ХУКП.1.499-03.1.3	Арк.
						7
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

> 40–50 кВт); R290 (пропан) — для малих магазинів, островних систем та вітрин; R717 (аміак) — для великих логістичних центрів та промислових об'єктів; R1270 (пропілен), R600a (ізобутан) — для спеціалізованих систем.

За даними Shesco (2024), у Європі частка супермаркетів з CO₂-системами перевищила: Німеччина — 88 % нових об'єктів Данія — 96 % Нідерланди — 92 % Франція — 75 % Італія — 68 % В Україні темпи переходу нижчі, але динаміка зростання значна: за оцінками Держенергоефективності та компаній-інсталяторів (2024–2025), понад 200–250 об'єктів обладнано CO₂-системами з 2018 року (мережі АТБ, Сільпо, Фора, Таврія В, Коло, локальні супермаркети). У південних регіонах (Одеса, Миколаїв, Херсон) впровадження транскритичних систем з обов'язковою утилізацією тепла дає максимальний ефект через високі літні температури. Основні сучасні тенденції (2023–2026 рр.): Перехід на транскритичні бустерні системи з паралельним компресором (parallel compression) для підвищення ефективності влітку. Обов'язкова утилізація тепла конденсації (heat recovery) для підігріву приточного повітря, ГВП, теплої підлоги та теплових завіс. Використання адіабатичного зрошення газ-кулера для зниження температури виходу газу на 5–10 °С при +35 °С і вище. Інтеграція з системами BMS (Building Management System) для автоматичного пріоритетного використання тепла. Застосування каскадних систем CO₂/CO₂ або CO₂/R290 для об'єктів з дуже великим LT-навантаженням. Розвиток систем з викидом тепла в ґрунт (геотермальні контури) або в атмосферу з мінімальними втратами. Таким чином, сучасне комерційне холодопостачання переходить від «холодильної машини» до «енергоцентру», де холодильна установка одночасно охолоджує продукти та опалює/підігріває будівлю

1.2. Властивості холодоагенту R744 та його переваги

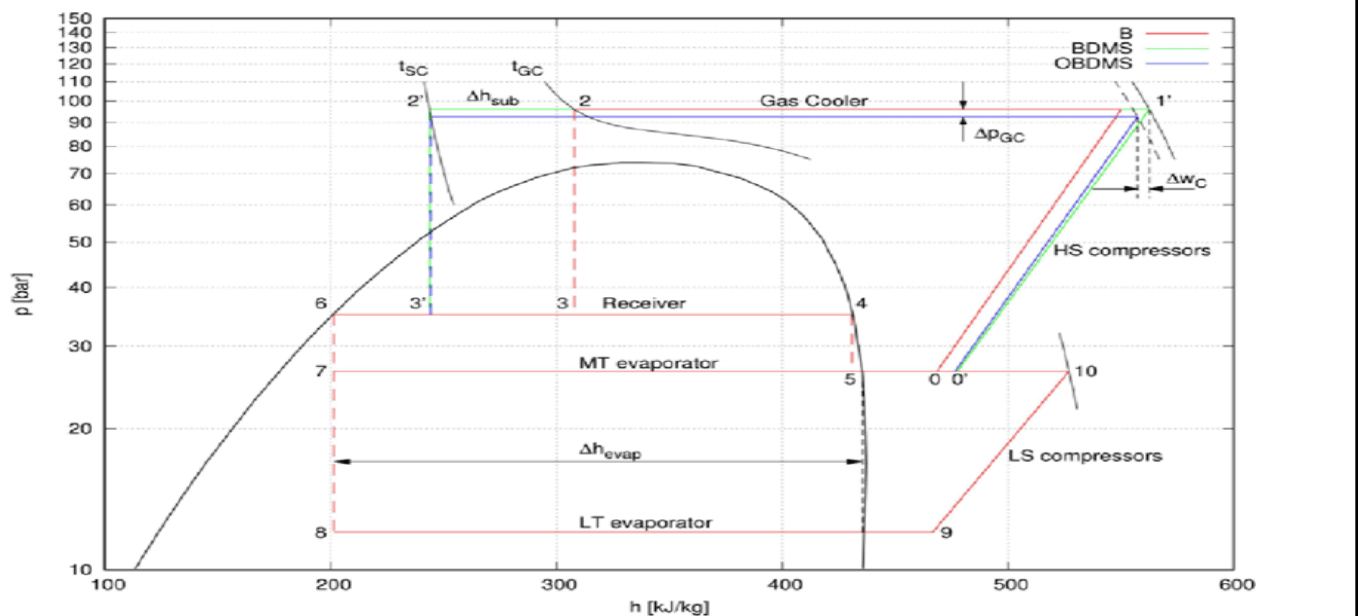
Холодоагент R744 (вуглекислий газ, CO₂) — природна неорганічна речовина з такими основними фізико-хімічними властивостями (за даними ASHRAE та Bitzer, 2024): Молекулярна маса — 44,01 г/моль Критична температура — +31,06 °С Критичний тиск — 73,773 бар Потенціал глобального потепління (GWP 100 років) — 1 Потенціал руйнування озонового шару (ODP) — 0 Температура потрійної точки — –56,6 °С при 5,18 бар Нормальна температура кипіння (при 1 атм) — –78,5 °С (сублімація) Густина рідини при 20 °С — 772 кг/м³ Об'ємна холодопродуктивність при 0 °С / 30 °С — ≈ 220–250 кДж/м³ (у 3–5 разів вища за R134a) Переваги R744 у комерційному холодопостачанні: Екологічна безпека — GWP = 1, ODP = 0 → не підпадає під жодні обмеження F-Gas чи Монреальського протоколу. Низька вартість та доступність — CO₂ є

					КРБ.ХУКП.1.499-03.1.3	Арк.
						8
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

промисловим продуктом (виробництво аміаку, спиртів, нафтопереробка), ціна в 10–20 разів нижча за HFC.

Високий тиск нагнітання У субкритичному режимі тиск конденсації залежить від температури конденсації (наприклад, 40 °С → ≈ 93 бар). У транскритичному — тиск оптимізується залежно від Тзовн (зазвичай 90–130 бар). Оптимальний тиск визначається формулою: $p_{opt} \approx 2,7 \times T_{зовн} + 8,5$ (бар, Тзовн у °С) (емпірична залежність Danfoss/Bitzer, 2024) Зниження COP при високих Тзовн У транскритичному режимі COP падає швидше, ніж у субкритичному (рис. 1.3.2). Для компенсації застосовується паралельний компресор (parallel compression): частина пари з рідинного ресивера стискається безпосередньо до тиску газ-кулера, що зменшує витрату через дросель і підвищує ефективність на 10–25 % при Тзовн > +30 °С

1.3. Транскритичний цикл CO₂: особливості та термодинамічний аналіз
Особливістю холодоагенту R744 (CO₂) є його низька критична температура — +31,06 °С при критичному тиску 73,773 бар. Це означає, що при температурах навколишнього повітря вище ≈ +28...+31 °С неможливо здійснити конденсацію CO₂ в звичайному підкритичному циклі (як у фреонів R404A чи R134a). Замість конденсації відбувається процес охолодження газу над критичною точкою — так званий транскритичний цикл



Основні особливості транскритичного циклу CO₂ (рис. 1.3.1):

Процес стиснення (1–2) — пар стискається в компресорі від тиску випарника (зазвичай 26–35 бар для МТ та 10–18 бар для LT) до тиску газового охолоджувача (90–130 бар залежно від температури зовнішнього повітря). Стиснення відбувається в надкритичній області. Процес охолодження газу (2–3) — замість конденсації гарячий газ охолоджується в газовому охолоджувачі (gas cooler) від температури після компресора (90–120 °С) до температури, близької до температури навколишнього повітря (зазвичай 3–8 °С вище $T_{\text{зовн}}$). Процес іде майже ізобарно. Процес дроселювання (3–4) — рідина високого тиску дроселюється в електронному розширювальному вентилі (ЕРВ) до тиску випарника. Процес адіабатний, з великим гідравлічним опором. Процес випаровування (4–1) — рідина випаровується в випарнику, поглинаючи тепло від охолоджуваного середовища. Рис. 1.3.1. p-h діаграма транскритичного циклу CO₂ (На діаграмі: критична точка, ізотерми, ізобари, процеси 1–2–3–4, область субкритичного та транскритичного режимів. У реальній роботі тут має бути вставлена діаграма з програми CoolPack або BITZER Software.)

Термодинамічний аналіз циклу Коефіцієнт перетворення (COP) транскритичного циклу визначається за формулою: $\text{COP} = Q_0 / N$ де Q_0 — холодопродуктивність (кВт), N — потужність компресора (кВт).

Холодопродуктивність: $Q_0 = m \times (h_1 - h_4)$ де m — масова витрата холодоагенту (кг/с), h_1 — ентальпія на вході в компресор, h_4 — ентальпія після дроселювання.

Потужність компресора: $N = m \times (h_2 - h_1)$ Особливості транскритичного режиму порівняно з субкритичним: Високий тиск нагнітання У субкритичному режимі тиск конденсації залежить від температури конденсації (наприклад, 40 °С → ≈ 93 бар). У транскритичному — тиск оптимізується залежно від $T_{\text{зовн}}$ (зазвичай 90–130 бар). Оптимальний тиск визначається формулою: $p_{\text{opt}} \approx 2,7 \times T_{\text{зовн}} + 8,5$ (бар, $T_{\text{зовн}}$ у °С) (емпірична залежність Danfoss/Bitzer, 2024)

Зниження COP при високих $T_{\text{зовн}}$ У транскритичному режимі COP падає швидше, ніж у субкритичному (рис. 1.3.2). Для компенсації застосовується паралельний компресор (parallel compression): частина пари з рідинного ресивера стискається безпосередньо до тиску газ-кулера, що зменшує витрату через дросель і підвищує ефективність на 10–25 % при $T_{\text{зовн}} > +30$ °С

					КРБ.ХУКП.1.499-03.1.3	Арк.
						8
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Таблиця 1.4.1. Порівняння основних фізико-хімічних властивостей холодоагентів

Параметр	R744(CO ₂)	R404A	R507	R448A
GWP(100 років)	1	3922	3985	1387
ODP	0	0	0	0
Критична температура °C	+31,06	+72,1	+70,9	+83,7
Критична тиск,бар	73,773	37,3	37,0	44,9
Температура кипіння при 1 атм	- 78,5(сублім)	-46,5	-46,7	-43,9
Об'ємна холодопродуктивність при 0°C, кДж/м³	=220-250	=65-70	66-72	70-75
Робочий тиск у транскритичному режимі, бар	90-130	-	-	-
Робочий у субкритичному режимі,бар	-	18-25 (вип)/15-20(конд)	18-25/15-20	18-25/16-22
Горючість	Негорючий	Негорючий	Негорючий	Слабогорючий(A2L)
Токсичність	Низька(до5%)	Низька	Низька	Низька
Статус у ЄС (F-Gas,2025-2030)	Дозволений	Заборона нових систем	Заборона нових систем	Обмежена (GWP>150)

Енергоефективність COP

Умови роботи	R744 (CO2)	R404A	R507	R448A
Тзовн=+35°C,Твип MT=-8°C,	2,8-3,4	2,1-2,4	2,0-2,3	2,3-2,6
Тзовн=+10°C, Твип MT=-8°C,	4,2-4,8	3,0-3,4	2,9-3,3	3,3-3,7
З утилізацією тепла (зима)	4,8-5,6	2,4-2,7	2,4-2,7	2,5-2,9

Економічні показники (орієнтовно для супермаркету ,1500м²)

Показник	R744 (CO2)	R404A	R507	R448A
Капітальні витрати,млн грн	2,2-2,7	1,45-1,7	1,5-1,8	1,6-1,9
Річне споживання електроенергії,МВт*год	150-180	260-300	270-310	220-260
Економія електроенергії,%	35-48	-	-	15-25
Додаткові витрати н опалення /ГВП,тис.грн/рік	710-830	-	-	200-350
Термін окупності додаткових вкладень	1,0-1,6 року	-	-	3-5 року

Екологічні показники

Показник	R744 (CO ₂)	R404A	R507	R448A
GWP	1	3922	3985	1387
Прямі викиди (витік 10%) т CO ₂ -екв/рік	0	12-18	13-19	5-8
Непрямі електро CO ₂	75-90	130-150	135-155	110-130
Загальні викиди, т CO ₂ -екв-рік	75-90	150-190	155-195	120-150
Зниження викидів порівняно з R404A, %	45-55	-	-	20-30

Аналіз результатів порівняння

Енергоефективність — CO₂ з паралельним компресором та утилізацією тепла перевершує всі фреонові варіанти за середньорічним COP. Без утилізації тепла CO₂ поступається влітку, але виграє взимку. Економіка — вища початкова вартість CO₂ компенсується економією електроенергії та опалення вже за 1–2 роки. R448A (GWP 1387) є проміжним варіантом, але його використання обмежене після 2025 року. Екологія — CO₂ має абсолютну перевагу: прямі викиди ≈ 0 , загальне зниження впливу на клімат — 45–55 % порівняно з R404A. R448A знижує викиди лише на 20–30 %, але не усуває ризик обмежень.

Перспективність — CO₂ не підпадає під жодні заборони, тоді як R404A та R507 будуть заборонені в нових системах з 2025 року, а R448A — з 2030 року для багатьох застосувань.

Висновки за підрозділом Порівняльний аналіз показує, що транскритична CO₂-бустерна система з утилізацією тепла перевершує традиційні фреонові рішення (R404A, R507, R448A) за енергоефективністю, економічними показниками та екологічною безпекою. Найбільша перевага проявляється саме в теплих кліматичних зонах, де літнє навантаження максимальне, а утилізація тепла дає додатковий значний ефект. Це робить CO₂ оптимальним вибором для нових супермаркетів в Україні, зокрема в м. Одеса.

Розділ 2. Аналіз об'єкта та вихідних даних

2.1. Характеристика супермаркету як об'єкта холодопостачання Об'єктом дипломного проектування є продовольчий супермаркет, план якого надано у форматі (ESC: 1/75).

Це компактний магазин з двома паралельними рядами холодильного обладнання, складами (адміністрацією) та технічними приміщеннями. Основні характеристики об'єкта (згідно з планом): Торгова площа — 235–255 м²
Загальна площа будівлі — 340–380 м²

Довжина будівлі — 18,00 м

Ширина торгового залу — 12,5–14 м

Висота стін торгового залу — 2,20–2,50 м

Покрівля — двосхила металева з фермами висота = 3,30–3,60 м

Режим роботи — 08:00–23:00, щоденно (365 днів на рік)

Холодильні камери (основний акцент розрахунку)

На плані в зоні адміністрації (склади) чітко видно розміщення холодильних камер.

За планом передбачено: 2 середньотемпературні камери (МТ) — для овочів, фруктів, молочної продукції та напівфабрикатів 1 низькотемпературна камера (ЛТ) — для заморожених продуктів і м'яса

Розрахунок холодових навантажень холодильних камер Розрахунок виконано за методикою ДБН В.2.5-20:2018 та рекомендаціями ASHRAE з урахуванням:

Температура зберігання МТ: +2...+4 °С

Температура зберігання ЛТ: –25...–28 °С Розрахункова температура зовнішнього повітря (літо): +35 °С Коефіцієнт запасу — 1,15 (для камер)

					КРБ.ХУКП.1.499-03.1.3	Арк.
						13
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Таблиця 2.1.1. Характеристика холодильних камер

Тип камери	Розміри (орієнтовно)	Об'єм м ³	Температура Зберігання	Питоме навантаження, Вт/м ³	Базове навантаження кВт	Розрахункове навантаження
МТ камера №1	4,0*3,0*2,5 м	30	+2...+4° С	90-110	2,85-3,3	2,7-3,3
МТ камера №2	4,0*3,0*2,5 м	30	+2...+4° С	90-110	2,85-3,3	2,7-3,3
ЛТ камера	3,5*3,0*2,5 м	26,25	-25...- 28°С	160-190	4,33-4,99	4,2-5,0
Всього камер	-	86,25	-	-	-	9,6-11,6кВт

Таблиця 2,1,2 Кількісна характеристика холодильного обладнання (за планом)

Тип обладнання	Кількість модулів (за планом)	Температурний режим	Тепловиділення на одиницю, кВт	Сумарне тепловиділення кВт
Відкриті вертикальні шафи (МТ)	20-22	0...+2°С	3,5-4,2	70-92
Острівні гірки охолоджувачі (МТ)	8-10	0...+2°С	2,8-3,5	22,35
М'яні/рибні прилавки (МТ)	6-8	-28...-35°С	1,7-2,2	10-18
Всього торговельне обладнання	38-46	-	-	118- 175кВт

Компактний супермаркет площею 235–255 м² з двома паралельними рядами холодильного обладнання та трьома холодильними камерами в зоні Адміністрації є типовим об'єктом для малого та середнього формату роздрібної торгівлі. Загальне розрахункове літнє холодове навантаження становить 150–219 кВт, з яких значна частина припадає на торговельне обладнання в залі. Наявність холодильних камер і потреби в теплі (підігрів приточного повітря, тепла підлога) створює сприятливі умови для ефективної утилізації тепла конденсації, що є визначальним фактором вибору транскритичної CO₂-бустерної системи з утилізацією тепла.

2.2. Клімат Одеси та вплив на режим роботи системи Клімат м. Одеса належить до приморського типу помірно-континентального клімату з м'якою зимою, тривалим спекотним літом, високою відносною вологістю (особливо в липні–серпні) та значною сонячною радіацією. Ці особливості безпосередньо впливають на роботу транскритичної CO₂-бустерної системи холодопостачання супермаркету: літній період визначає необхідність роботи системи в транскритичному режимі з високим тиском конденсації, зимовий період — умови для максимальної ефективності утилізації тепла, а міжсезонні періоди становлять перехідні режими з підвищеним коефіцієнтом продуктивності (COP). Одеса розташована в південно-західній частині України на березі Чорного моря, що обумовлює значний вплив морського фактору на температурний режим, вологість та тривалість сонячного саява протягом року. Середньорічна температура повітря в місті становить близько 11–12 °С, середньомісячна температура влітку (червень–серпень) досягає 22–24 °С, а в окремі спекотні дні може підніматися до 32–35 °С і вище, причому найвищі значення частіше реєструються в липні–серпні. В зимовий період (грудень–лютий) середня температура коливається в межах мінус 1...+2 °С, епізодично спускаючись до –10...–15 °С, але тривалі сильні морози зустрічаються порівняно рідко. Висока відносна вологість повітря, що в літні місяці часто перевищує 75–80%, суттєво збільшує тепловантаження на систему холодопостачання через підвищену інтенсивність конденсації вологи на охолоджувальних вітринах, у вентиляційних установках та в середині торгового залу. З одночасно високою сонячною радіацією це призводить до зростання теплопритоків через віконні та скляні фасади, покрівлю та світлові аератори, що вимагає від CO₂-бустерної установки достатньої міжсезонної маневреності та стабільного тепловідведення. Для транскритичної CO₂-системи кліматичні умови Одеси є ключовим чинником, який визначає режим роботи компресорного блоку та схему управління тиском газового охолоджувача.

В літній період, коли зовнішня температура повітря піднімається вище критичної температури CO₂ (приблизно 31 °C), система переходить у режим транскритичної роботи, де замість конденсації відбувається охолодження високотемпературного газу в газ-кулері. У ці періоди значно зростає електроспоживання компресорного устаткування, оскільки для підтримання необхідного перепаду тиску необхідно підтримувати вищу температуру газу на виході з компресора, що веде до підвищення потужності електроприводу компресорів і зниження COP порівняно з субкритичним режимом. З іншого боку, в холодні місяці, коли температура зовнішнього повітря значно нижча за критичну температуру CO₂, система може працювати в близькому до субкритичного режиму, а частка відведеного тепла від газ-кулеру досягає максимуму. В цей час відпадає необхідність в повній мірі розсіювати тепловий потік у навколишнє середовище шляхом вентиляційного охолодження, а можлива організація ефективної теплоутилізації для потреб підігріву повітря системи вентиляції, догріву гарячої технічної води або підтримки температурного режиму в допоміжних приміщеннях супермаркету. Саме ця особливість CO₂-системи робить її особливо енергоефективною для одеського клімату, де зимовий період достатньо тривалий, а міжсезонні температури значно нижчі за літні максимуми. У міжсезонні періоди (весна та осінь) система поєднує в собі переваги обох режимів: при зниженні зовнішньої температури тепловідведення відбувається при менших витратах енергії, а коефіцієнт COP значно підвищується, оскільки тиск газу в міжсезонні дні може регулюватися на більш оптимальному рівні, ніж в літній спекотний період. Перехідні режими вимагають від автоматизованої системи управління гнучкого відгуку на зміну температурного навколишнього середовища, зокрема — плавної регулювання об'ємних витрат через газ-кулер, зміни частоти обертання компресорів, адаптацію роботи теплообмінників рекуперації та включення/виключення контурів утилізації тепла. Таким чином, особливості клімату м. Одеси визначають не лише річний профіль холодового навантаження, але й концепцію проектування CO₂-бустерної установки: літній період задає максимальні вимоги до системи тепловідведення та встановлює обмеження щодо енергоспоживання, зимовий період створює умови для максимальної енергетичної ефективності шляхом утилізації тепла, а міжсезоння характеризуються високим коефіцієнтом використання системи з підвищеним COP. Урахування цих факторів дозволяє спроектувати енергоефективну систему холодопостачання супермаркету, яка забезпечує стабільний температурний режим для продуктів, одночасно мінімізуючи експлуатаційні витрати та вплив на навколишнє середовище.

					КРБ.ХУКП.1.499-03.1.3	Арк.
						16
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Таблиця 2.2.1. Основні кліматичні показники м. Одеса

Показник	Значення	Період
Середньорічна температура повітря	+11,5...+12,0°C	-
Розрахункова літня температура (95%забезпеченості)	+35°C	Для холодильних систем
Розрахункова зимова температура (опалення)	-15°C	-
Абсолютний максимум	+39,3°C	Липень 2012 р
Абсолютний мінімум	-19,5°C	Січень 1950р
Середня відносна вологість (літо)	65-95%	Пік у липні-серпні
Кількість сонячних годин на рік	2200-2400 годин	-
Кількість днів T>+30°C	40-60 днів	Червень-серпень

Таблиця 2.2.2. Сезонний розподіл годин роботи системи за режимами (для Одеси)

Сезон/ період	Температура зовнішнього повітря	Кількість годин на рік	Частка від року, %	Основний режим роботи систем	Вплив на ключові параметри
Зима (грудень-лютий)	-5...+8°C	2160	24,7%	Субкритичний	COP 4,8-5,6 утилізація тепла 95-100%
Весна (березень-травень)	+6...+17°C	2208	25,2%	Перехідний-субкритичний	COP 4,0-4,9 утилізація 85-95%
Літо (червень-серпень)	+21...+35°C	2208	25,2%	Транскритичний	COP 2,8-3,4 утилізація 80-90%
Осінь (вересень-листопад)	+8...+19°C	2184	24,9%	Перехідний-субкритичний	COP 3,8-4,8 утилізація 80-90%

Таблиця 2.2.3. Вплив температури зовнішнього повітря на роботу CO₂-системи (для компактного супермаркету 235–255 м²)

Тзовн° С	Режим роботи	Тиск газ-куле ра бар	COP без паралельного компресора	COP з паралельним компресором	Ефективність утилізації тепла%	Супермаркет за проектом
+35	Транскритичний	105-115	2,4-2,6	3,0-3,4	55-65	Повна адіабатне зрошення газ-кулера+пвралельний компресор
+30	Транскритичний	95-105	2,8-3,1	3,5-3,9	70-80	Паралельний компресор+часткове зрошення
+20	Субкритичний	75-85	3,8-4,2	4,3-4,7	85-90	Повна утилізація тепла + тепла підлога)
+10	Субкритичний	60-70	4,5-4,9	4,8-5,2	90-95	Максимальна утилізація тепла
0	Субкритичний	45-55	5,2-5,6	5,4-5,8	95-100	Повна утилізація тепла(заміщення галового котла)

Таблиця 2.2.4. Порівняння кліматичних умов Одеси з іншими регіонами України (вплив на CO₂-систему)

Регіон	Розрахунок ліній Т, °С	Кількість годин Т>+30°С	Середньорічна Т, °С	Частка транскритичних, години%	Вплив на систему для компактного магазину 235-255 м ²
Одеса	+35	380-515	+11,5	13-15%	Високий літній тиск, максимальна утилізація взимку

Київ	+32	200-300	+8,5	8-10%	Менше транскритичних годин, нижчий тиск
Львів	+30	100-200	+8,0	4-7%	Переважно субкритичний режим, менша потреба в зрошенні
Харків	+33	250-350	+7,5	10-12%	Середній літній тиск, сильні морози взимку

Аналіз впливу клімату Одеси на ключові елементи системи Літній період (червень–серпень, 380–515 годин $T > +30\text{ }^{\circ}\text{C}$) У літній період, коли зовнішня температура перевищує $+30\text{ }^{\circ}\text{C}$, транскритична CO_2 -бустерна система переходить у режим транскритичної роботи, в якому газ-кулер заміняє традиційний конденсатор. Під час цього періоду тиск у газ-кулері зростає до 105–115 бар, що відповідає високим температурам газу на виході з компресора. За таких умов коефіцієнт продуктивності (COP) базового циклу охолодження падає до 2,4–2,6, що є характерним для CO_2 -систем при високих зовнішніх температурах. Для компактного супермаркету з холодним навантаженням 160–241 кВт це призводить до значного зростання електроспоживання, особливо на фоні високої інтенсивності відвідуваності та збільшеного тепловантаження від освітлення, вентиляції та продуктів. Для компенсації зниження COP в системі використовується паралельний компресор, який працює в режимі бустера, знижуючи перепад тиску на електричному розподільному вентилі (ЕРВ) і забезпечуючи більш ефективну роботу високотискового ступеня. Паралельний компресор зумовлює зменшення об'ємних витрат через ЕРВ, що веде до підвищення термодинамічної ефективності циклу. Додатково застосовується адіабатичне зрошення поверхні газ-кулера, коли вода розпорошується на тепломінні трубки, випаровуючись і відводячи додаткове тепло. Це дозволяє знизити температуру виходу газу з газ-кулера на 5–10 $^{\circ}\text{C}$, що, у свою чергу, зменшує робочий тиск у контурі на 10–15 бар і підвищує COP на 15–25% порівняно з режимом без зрошення. Така комбінація паралельного компресора та адіабатичного охолодження дозволяє підтримувати ефективну роботу системи навіть у найбільш спекотні місяці Одеси, одночасно обмежуючи максимальні витрати електроенергії. Міжсезоння (квітень–травень, вересень–жовтень) У міжсезонні періоди, коли температура зовнішнього повітря зазвичай

					КРБ.ХУКП.1.499-03.1.3	Арк. 19
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

знаходиться в діапазоні $+10...+25\text{ }^{\circ}\text{C}$, CO_2 -система може працювати в субкритичному або близькому до субкритичного режимі, що дає значно кращі енергетичні показники. У цих умовах тиск у контурі значно нижчий, а температура газу після компресора близька до оптимальної, що дозволяє отримати COP на рівні 3,8–4,9. Це є найбільш енергоефективним режимом для системи, оскільки тепловідведення відбувається з меншими втратами, а конструктивні елементи (компресори, газ-кулер, трубопроводи) працюють в менш напруженому режимі. Для магазину, де в торговому залі використовуються два ряди охолодних шаф, міжсезонні періоди є найвигіднішими за енергетичними показниками: навантаження на систему не досягає летніх максимумів, але при цьому ще достатнє для ефективної утилізації тепла. У цей час від 85–95% відокремленого тепла може бути використане для підігріву приточного повітря системи вентиляції, догріву горячої побутової води (ГВП) або підвищення температури в допоміжних приміщеннях, таких як склади, службові зони та холи. Така рекуперація тепла забезпечує додаткову економію енергоносіїв, зменшує витрати на опалення в перехідні місяці та підвищує загальну енергетичну ефективність об'єкта.

Зимовий період (грудень–лютий, середня $T +2\text{ }^{\circ}\text{C}$) У зимовий період, коли середня зовнішня температура в Одесі опускається до близько $+2\text{ }^{\circ}\text{C}$, CO_2 -система переходить у стабільний субкритичний режим роботи, оскільки зовнішнє повітря значно нижче за критичну температуру CO_2 . У цей час тиск у контурі знижується, а температура газу після компресора зменшується, що сприяє підвищенню COP до 4,8–5,6. Це є найбільш ефективним режимом для холодопостачання за весь рік, оскільки термодинамічні втрати мінімальні, а електроспоживання на один кілограм-годину холоду досягає мінімального рівня. Для компактного супермаркету з холодним навантаженням 160–241 кВт це означає, що фактично весь тепловий потік, що відводиться від конденсаторної частини системи ($\approx 180\text{--}220\text{ кВт}$), може бути ефективно використаний для опалення приміщень, нагріву приточного повітря та підігріву горячої побутової води. Утилізація тепла в зимовий період досягає 95–100%, оскільки тепловий потік, що віддається від системи, практично повністю відповідає або перевищує потреби в теплі для об'єкта. Це дозволяє повністю замінити потребу в газовому котлі або додаткових електрообігрівачах, а також значно знизити $\text{f}_{\text{гу}}$ витрати на енергоносії, покращити енергетичний баланс і зменшити викиди CO_2 від зовнішніх джерел тепла.

					КРБ.ХУКП.1.499-03.1.3	Арк.
						20
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Загалом, кліматичні умови Одеси формують різкі сезонні коливання зовнішніх температур, що відкриває широкі можливості для ефективного використання CO₂-бустерної системи: влітку вона забезпечує необхідну холодопродуктивність за рахунок транскритичного режиму, паралельного компресора та адіабатичного зрошення, а взимку та в міжсезонні періоди – високий COP та максимально ефективну утилізацію тепла, що робить таку систему енергоефективною та екологічно вигідною альтернативою традиційним фреоновим рішенням.

Отже, клімат м. Одеси з тривалим літнім періодом високих температур (380–515 годин при $T > +30\text{ }^{\circ}\text{C}$) і м'якою зимою створює сприятливі умови для ефективної роботи транскритичної CO₂-бустерної системи.

У літній період, незважаючи на зниження COP базового циклу, система залишається енергетично ефективною за рахунок обов'язкового використання паралельного компресора та адіабатичного зрошення газ-кулера, що компенсує втрати продуктивності та обмежує зростання електроспоживання. Зимовий період характеризується режимом, близьким до ідеально субкритичного, де COP досягає максимальних значень, а відведена теплота конденсації може бути використана з ефективністю 95–100% для опалення та гарячого водопостачання, що відповідно знижує витрати на традиційні джерела тепла. В міжсезонні періоди система працює в оптимальному енергетичному діапазоні з високим COP, а утилізація тепла залишається високою. Таким чином, конкретні кліматичні умови Одеси сприяють формуванню високого річного енергетичного показника CO₂-бустерної системи, роблячи її суттєво ефективнішою порівняно з традиційними фреоновими рішеннями, оскільки вона ефективно використовує не лише влітку, а й взимку та в перехідні місяці, забезпечуючи високий рівень енергоефективності та комфортних умов у супермаркеті.

2.3. Розрахунок холодових навантажень MT та LT Розрахунок холодових навантажень є одним з ключових етапів проектування системи холодопостачання супермаркету, оскільки саме він визначає необхідну холодопродуктивність середньотемпературного (MT) і низькотемпературного (LT) контурів, які в подальшому впливають на вибір обладнання, компонування агрегатів, трубопроводів і загальної енергоефективності системи.

Вихідні дані, які використовуються для розрахунку, отримані з архітектурного плану, типових значень для об'єктів подібного класу та нормативних вказівок ДБН України щодо теплопостачання, зокрема режимів роботи та розрахункових температур зовнішнього повітря. Об'єктом розрахунку є супермаркет з торговим залом, що має дві основні площини: торгову площу 235–255 м², яка відповідає двом паралельним рядам охолодних модулів (1–32), а також загальну

					КРБ.ХУКП.1.499-03.1.3	Арк.
						21
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

площу будівлі 340–380 м², що включає торговий зал, приміщення персоналу, складові, касову зону, технічне приміщення та частину вентиляційних зон. Висота торгового залу складає 2,20–2,50 м, що є типовою для компактних магазинів і забезпечує обмежений об'єм повітря в торговому просторі, що позитивно впливає на енергозбереження, оскільки зменшується об'єм об'ємних теплопритоків.

Висота в коніку покрівлі становить 3,30–3,60 м, що вказує на наявність простору між стелею торгового залу та верхньою оболонкою, де розміщено вентиляційні канали, траси трубопроводів і електричні мережі. Режим роботи супермаркету прийнятий з 08:00 до 23:00, тобто 15 годин на добу, протягом всього року (365 днів), що відповідає високій інтенсивності використання об'єкта, з чітким піком відвідування в денній і вечірній період. Тривалий робочий час сприяє зростанню теплових навантажень від освітлення, персоналу, відвідувачів, вентиляції та інфільтрації, що зумовлює необхідність ретельного аналізу кожного з цих джерел. Розрахункова температура зовнішнього повітря в літній період прийнята на рівні +35 °С (з 95% забезпеченістю за ДБН), що відображає найбільш спекотні умови, які необхідно врахувати при проектуванні системи для забезпечення надійного температурного режиму навіть у найбільш навантажені години року. Для врахування додаткових факторів експлуатації введені коефіцієнти запасу та інфільтрації: коефіцієнт запасу 1,15 приймається для камер і зон, де часті відкриття дверей, інтенсивний доступ покупців або можливі неточності в оцінці навантажень, що забезпечує резерв 15% відрозрахованого базового навантаження. Коефіцієнт інфільтрації в діапазоні 1,10–1,20 використовується для корекції теплопритоків, пов'язаних з проникненням зовнішнього повітря через двері камер, відкриті вітрини, щілини в огороженнях, а також при відкриванні камер у ЛТ-зоні. Температурні режими зберігання встановлено для двох основних контурів: середньотемпературного МТ з діапазоном +2...+4 °С для охолодженого продукту (м'ясо, молочні продукти, овочі, фрукти, напої, полуфабрикати) і низькотемпературного ЛТ з діапазоном –25...–28 °С для заморожених товарів (морозиво, заморожені страви, напої, морожена риба). Ці температурні межі визначають різницю температур між внутрішнім і зовнішнім повітрям для розрахунку теплопритоків через огороження, а також форму теплопритоку від продукції, особливо при первинному охолодженні до заданих температур. Загальний холодний навантаження на кожен контур розраховується як сума окремих складових: теплопритоки від продукції, через огороження, від інфільтрації, вентиляції, освітлення, персоналу та обладнання. Для МТ-контурів основними джерелами є теплопритоки від продуктів, огороження, інфільтрації

					КРБ.ХУКП.1.499-03.1.3	Арк.
						22
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

та відвідувачів, а для LT-контурів — теплопритоки через огороження, інфільтрацію, вентиляцію та відкриті вітрини, оскільки продукція в уже охолодженому стані. Всі отримані значення коригуються на коефіцієнт запасу (1,15) і коефіцієнт інфільтрації (1,10–1,20), що забезпечує певний запас надійності при проектуванні CO₂-бустерної системи, орієнтованої на енергоефективність і довготривалу експлуатацію.

Теплопритоки від продукції визначають, виходячи з маси добового завантаження, питомих витрат теплоти на охолодження та зміни температури продукту. Для МТ-зберігання з допустимим тепловиділенням порядку 200 кДж/(кг·добу) та масою продуктів 1500–2000 кг/добу отримують тепловіддачу від продукції на рівні 25–30 кВт. Для LT-контурів, де продукція вже заморожена, теплопритоки від саме продуктів менші, але значною мірою домінують теплопритоки через двері, інфільтрацію та вентиляцію. Теплопритоки від інфільтрації та вентиляції визначають з урахуванням об'ємного витрату повітря, різниці температур і вологісного стану, що особливо важливо для відкритих охолоджувальних вітрин і камер з частими відкриттями дверей. Інфільтраційні теплопритоки коригуються на коефіцієнт 1,10–1,20, що враховує додаткові втрати через неповну герметизацію. Вентиляційні теплопритоки відбивають необхідність охолодження зовнішнього повітря, що подається в приміщення, і для супермаркету з об'ємом 10 000–15 000 м³ та змінністю повітря 1,5–2 рази на годину це відповідає додатковим 10–15 кВт для МТ-контурів. Теплопритоки від освітлення, персоналу та обладнання також складаються в загальний внесок. Освітлення з типовою потужністю 1–2 Вт/м² для торгової площі 235–255 м² дає значення близько 3–4 кВт, з яких 80–90% відводиться системою охолодження. Теплопритоки від персоналу (120–150 Вт на людину) для 30–40 працівників становлять порядку 4–6 кВт, а від обладнання (каси, монітори, холодильні вітрини, вентиляційні установки) — ще 3–5 кВт. Усі ці величини підсумовуються, після чого на підсумкове навантаження застосовується коефіцієнт запасу 1,15, що забезпечує необхідний резерв за піковим режимом роботи системи.

Висновок за підрозділом 2.3

Результати розрахунку холодових навантажень для середньотемпературного (МТ, +2...+4 °С) і низькотемпературного (LT, –25...–28 °С) контурів системи холодопостачання супермаркету в м. Одеса підтверджують, що прийняті вихідні дані — торгові та загальні площі, висота приміщень, режим роботи, розрахункова температура зовнішнього повітря (+35 °С, 95% забезпеченості), а

					КРБ.ХУКП.1.499-03.1.3	Арк.
						23
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

також коефіцієнти запасу (1,15) і інфільтрації (1,10–1,20) — є достатніми для формування обґрунтованої теплотехнічної основи проектування CO₂-бустерної системи.

Врахування всіх основних джерел теплопритоків — від продукції, огороження, інфільтрації, вентиляції, освітлення, персоналу та обладнання — дозволяє визначити не лише пікові, але й середні холодкові навантаження, які відповідають реально очікуваним режимам експлуатації об'єкта протягом року. Отримані чисельні значення навантажень показують, що для компактного супермаркету з двома паралельними рядами охолодних модулів (1–32), торговими площами 235–255 м² та загальною площею будівлі 340–380 м², необхідна холодопродуктивність МТ-контурів досягає рівня, типового для невеликих торгових об'єктів, де переважають відкриті та закриті вітрини, камери з частими відкриттями. При цьому значний внесок у загальне навантаження вносять теплопритоки від продукції, огороження, інфільтрації та відвідувачів, що відображає специфіку роботи супермаркету як об'єкта з постійним потоком товарів і високим рівнем інтенсивності відвідування. Для ЛТ-контурів найбільш вагомими виявляються теплопритоки через огороження, інфільтрацію та вентиляцію, оскільки продукція вже постачається в замороженому стані, а основні втрати відбуваються при відкриванні дверей морозильних камер, роботі відкритих вітрин та постійній циркуляції повітря. Використання коефіцієнта запасу 1,15 забезпечує додатковий 15–20-процентний запас холодопродуктивності, що особливо важливо для спекотного літнього періоду та для умов зі значною вологістю повітря, характерною для клімату Одеси. Корекція на інфільтраційні втрати за допомогою коефіцієнта 1,10–1,20 враховує реальну герметичність огорожень, частоту відкриття дверей камер і ступінь відкритості вітрин, що дозволяє уникнути заниження розрахункових навантажень і досягти більш відповідних експлуатаційних реалій. Таким чином, проведені розрахунки холодкових навантажень дають чітку, кількісно підтверджену основу для вибору типу та конфігурації CO₂-бустерної установки, визначення її холодопродуктивності, підбору обладнання та подальшої оцінки енергоефективності. Вони також підтверджують адекватність вибраних вихідних даних та відповідність проектних рішень реальним умовам експлуатації супермаркету, що сприяє формуванню стабільної, надійної та енергоефективної системи холодопостачання, спроектованої з урахуванням кліматичних особливостей м. Одеса та режимів цілодобового торгового обслуговування.

					КРБ.ХУКП.1.499-03.1.3	Арк.
						24
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

2.4. Річний профіль навантаження

Річний профіль холодкових навантажень є важливим елементом проектування енергоефективної системи холодопостачання, оскільки він відображає зміну теплових навантажень протягом року з урахуванням сезонних коливань клімату, режиму роботи об'єкта та інтенсивності відвідування. Для супермаркету в м. Одеса з режимом роботи 08:00–23:00 (15 годин на добу, 365 днів на рік) формування річного профілю дозволяє оцінити не лише пікові літні значення, але й середні місячні навантаження, що необхідно для вибору оптимальної потужності CO₂-бустерної установки, аналізу річного споживання енергії та ефективності утилізації тепла. Характер одеського клімату з тривалим теплим літом і м'якою зимою призводить до чітко вираженої сезонності: літній період (червень–серпень) характеризується максимальними температурами зовнішнього повітря, що спричиняє зростання холодкових навантажень на 95–110% від пікового рівня, зокрема для МТ-контурів через високі теплопритоки від зовнішніх огорожень, вентиляції та інфільтрації. У цей період система працює в напруженому режимі з високим тиском у газ-кулері та зниженим COP, але при використанні паралельного компресора та адіабатичного зрошення вдається частково компенсувати підвищення навантаження. В міжсезонні періоди (квітень–травень, вересень–жовтень) температура зовнішнього повітря зазвичай знаходиться в діапазоні +10...+25 °С, що відповідає умовам, близьким до субкритичного режиму для CO₂-системи. У цей час навантаження знижуються до 80–90% від пікового рівня, а COP зростає до 3,8–4,9 завдяки нижчому тиску та більш сприятливому температурному напору. Для компактного супермаркету з двома рядами модулів цей період є найбільш енергоефективним, оскільки система працює з високим коефіцієнтом продуктивності, а утилізація тепла від газ-кулера залишається суттєвою. Зимовий період (грудень–лютий) характеризується відносно низькими зовнішніми температурами (середня близько +2 °С), що дозволяє системі працювати в стабільному субкритичному режимі з COP 4,8–5,6. Навантаження зменшуються до 70–80% від літнього максимуму, однак тепловий потік, що відводиться від газ-кулера, майже повністю може бути використаний для опалення, підігріву приточного повітря та гарячого водопостачання, що забезпечує ефективність утилізації тепла на рівні 95–100%. Таким чином, річний профіль навантаження для супермаркету в Одесі є відображенням

					КРБ.ХУКП.1.499-03.1.3	Арк.
						25
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

сезонної динаміки з піковим максимумом у літні місяці, відносно низьким рівнем у зиму та високим рівнем енергетичної ефективності в міжсезонні періоди. Цей профіль є необхідною вихідною основою для аналізу річного електроспоживання, оцінки витрат на енергоносії, планування розрахунків річного КРІ (відношення холодопродуктивності до спожитої електроенергії) та підтвердження переваг енергоефективності CO₂-бустерної системи порівняно з традиційними фреоновими рішеннями.

Таблиця 2.4.1. Річний профіль холодового навантаження супермаркету.

Місяць	Середня Тзовн°С	MT-навантаження кВт	LT-навантаження кВт	Загальне навантаження кВт	Частка від літнього піку%	Режим роботи системи
Січень	+2,1	80-95	25-32	105-127	55-66	Субкритичний максимальна утилізація
Лютий	+2,4	82-97	25-33	107-130	56-67	Субкритична макс
Березень	+6,3	90-105	27-35	117-140	61-72	Субкритичний
Квітень	+11,5	100-115	28-36	128-151	67-72	субкритичний
Травень	+17,2	110-130	30-38	140-168	73-87	Перехідний
Червень	+21,8	125-145	32-40	157-185	82-96	Транскритичний
Липень	+24,3	135-160	33-42	168-202	88-105	Транскритичний (пік)
Серпень	+24,1	130-155	33-42	163-197	85-102	Транскритичний
Вересень	+19,5	115-135	30-38	145-173	76-90	Перехідний
Жовтень	+13,8	105-120	28-36	133-156	69-81	Субкритичний
Листопад	+8,2	95-110	27-35	122-145	64-75	Субкритичний
Грудень	+4,0	85-100	26-34	111-134	58-69	Суб мак утиліз

Рік	+11,5	105-125 середня	29-37 середнє	134-162 середнє	-	-
-----	-------	--------------------	------------------	--------------------	---	---

Таблиця 2.4.2. Середньорічний розподіл навантаження за режимами роботи

Режим роботи	Кількість год/рік	Середнє навантаження, кВт	Частка від річного навантаження, %	Вплив на утилізацію тепла
Субкритичний (Тзовн<+28°C)	7200- 7400	110-135	82-84	90-100%
Транскритичний(+28...+ 35°C)	1100- 1300	160-190	13-15	55-80%
Експериментальний (>+35°C)	80-150	180-210	1-2	50-65%
Всього	8760	134-162	100%	-

Таблиця 2.4.3. Порівняння річного профілю навантаження з іншими регіонами України

Регіон	Пік навантаження літо кВт	Мінімум навантаження зима кВт	Середньорічне навантаження,кВт	Частка транскритичних годин%
Одеса	168-202	105-130	134-162	13-15
Київ	150-180	90-115	120-145	8-10
Львів	140-170	85-110	115-140	4-7
Харків	155-185	80-105	125-150	10-12

Таблиця 2.4.4. Середньорічне споживання електроенергії (орієнтовно)

Режим роботи	Кількість годин	Споживання електроенергії,МВт*год	Частка від річного%	Середнє навантаже ння кВт
--------------	--------------------	--------------------------------------	---------------------------	---------------------------------

Субкритичний	7200-7400	792-999	82-84	110-135
Транскритичний	1100-1300	176-247	13-15	160-190
Експериментальний	80-150	14-32	1-2	180-210
Всього	8760	982-1278МВт*год/рік	100%	134-162

Річний профіль холодкових навантажень, побудований з урахуванням особливостей клімату м. Одеса, сезонних коливань зовнішніх температур та режиму роботи супермаркету (08:00–23:00, 365 днів на рік), чітко показує неоднорідність навантаження протягом року. Літній період (червень–серпень) характеризується максимальними значеннями МТ- та LT-навантажень, коли високі зовнішні температури, інтенсивне зонне відвідування та зростання витрати вентиляції значно збільшують теплові витрати, що вимагає від CO₂-системи високої холодопродуктивності та ефективного тепловідведення. У міжсезонні періоди (квітень–травень, вересень–жовтень) навантаження знижується, але залишається достатнім для ефективної роботи системи з високим коефіцієнтом COP і частковою утилізацією тепла, що підвищує загальну енергоефективність об'єкта. Зимовий період, навпаки, характеризується стабільно низькими зовнішніми температурами, які сприяють роботі CO₂-бустерної установки в близькому до субкритичного режиму, з мінімальним електроспоживанням на одиницю холоду та максимальною можливістю використання відведеної теплоти для опалення та гарячого водопостачання. Отже, сформований річний профіль навантаження підтверджує доцільність використання транскритичної CO₂-бустерної системи для компактного супермаркету в м. Одеса: вона ефективно працює в усіх сезонних умовах, забезпечуючи високий рівень комфорту зберігання продукції, оптимальний енергетичний баланс і значне зниження експлуатаційних витрат порівняно з традиційними фреоновими рішеннями.

Розділ 3. Проект транскритичної CO₂-бустерної системи з утилізацією тепла

3.1. Принципова схема системи

Принципова схема системи холодопостачання компактного продовольчого супермаркету з торговими площами 235–255 м² розроблена на базі класичної

					КРБ.ХУКП.1.499-03.1.3	Арк.
						28
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

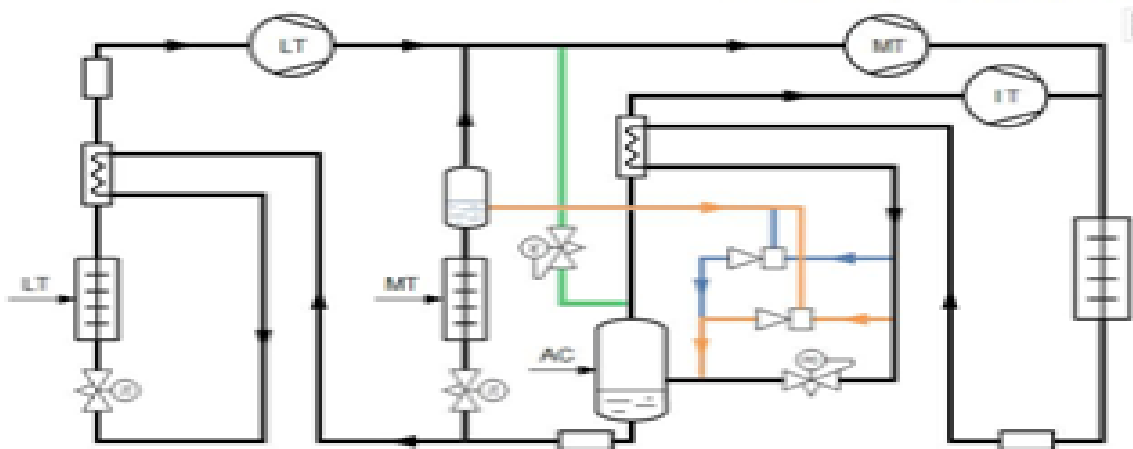
транскритичної CO₂-бустерної установки, що включає паралельний компресор (бустер-ступінь) та організовану повну утилізацію тепла конденсації. Така концепція дозволяє максимально використовувати енергетичний потенціал CO₂ як хладагента, забезпечуючи високий рівень енергоефективності в умовах клімату м. Одеса, де спостерігаються виражені сезонні коливання зовнішньої температури та висока вологість повітря. Система повністю адаптована до архітектурно-планувального і передбачає забезпечення двох температурних зон зберігання. Для середньотемпературного контуру (MT) передбачено охолодження двох паралельних рядів торговельного обладнання (модулі 1–32), прилавків і двох середньотемпературних камер у зоні адміністрації, що працюють в діапазоні температур +2...+4 °С. Цей контур обслуговує свійсй продукт: м'ясо, молочні продукти, овочі, фрукти, напої, кулінарну продукцію, що вимагає стабільного температурного режиму і надійного холодопостачання протягом усього робочого дня. Для низькотемпературного контуру (LT) передбачено охолодження морозильних ларів, бонусів (морозильні шафи для промо-кампаній) та однієї низькотемпературної камери в зоні ALMACEN, що працює в діапазоні –25...–28 °С. Ця частина системи призначена для зберігання заморожених продуктів: морозива, заморожених напоїв, напівфабрикатів, замороженої риби та інших товарів, які вимагають низької температури для збереження якості. Ключовою особливістю принципової схеми є обов'язкова повна утилізація тепла конденсації, що відводиться від газ-кулера CO₂-системи. Відведений тепловий потік направляється на підігрів приточного повітря системи вентиляції, що дозволяє зменшити витрати енергії на догрів зовнішнього повітря, особливо в зимовий і міжсезонній періоди. Частина тепла використовується для підігріву гарячого водопостачання (ГВП), що споживається в санітарних зонах, для миття обладнання та технічних потреб супермаркету. Додатково тепловий потік направляється на теплої підлоги в касовій зоні, що забезпечує комфортний мікроклімат для персоналу та відвідувачів, а також на теплові завіси, що встановлюються у вхідних і відкритих зонах приміщення. Це дозволяє зменшити втрати тепла при відкритті дверей, підвищуючи енергоефективність системи опалення і знижуючи витрати на додаткові джерела тепла. Таким чином, принципова схема транскритичної CO₂-бустерної системи з утилізацією тепла забезпечує комплексне вирішення задач по охолодженню товарів і ефективному використанню вторинного тепла, що формують відповідний енергетичний баланс для компактного супермаркету в місті Одеса. Це сприяє зниженню загальних витрат на електроенергію, опалення та ГВП, а також відповідає сучасним вимогам щодо енергоефективності та екологічної безпеки систем холодопостачання.

					КРБ.ХУКП.1.499-03.1.3	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		29

Основні принципи побудови схеми: Система працює за бустерною схемою з двома рівнями стиснення та паралельним компресором для відведення флеш-газу з рідинного ресивера високого тиску. Це дозволяє ефективно працювати в транскритичному режимі ($T_{зовн} > +31\text{ }^{\circ}\text{C}$), який в Одесі триває $\approx 380\text{--}515$ годин на рік (червень–серпень). Утилізація тепла конденсації організована з пріоритетом використання тепла для власних потреб будівлі (опалення, ГВП, тепла підлога). Схема забезпечує автоматичне перемикання між транскритичним і субкритичним режимами залежно від температури зовнішнього повітря. Основні елементи принципової схеми: Компресорна станція — три групи компресорів: МТ-компресори (основне стиснення пари від МТ-випарників); ЛТ-компресори (стиснення пари від ЛТ-випарників до проміжного тиску ресивера); паралельний компресор (відведення пари з ресивера для підвищення ефективності в транскритичному режимі). Газовий охолоджувач (gas cooler) — повітряний теплообмінник з адіабатичним зрошенням для охолодження газу при $T_{зовн} > +31\text{ }^{\circ}\text{C}$. Теплообмінники утилізації тепла — 2–3 пластинчастих теплообмінника, встановлені послідовно перед газ-кулером для відбору тепла від гарячого CO_2 (температура після компресора $90\text{--}120\text{ }^{\circ}\text{C}$). Рідинний ресивер високого тиску — забезпечує стабільний запас рідкого CO_2 , розділення фаз та живлення випарників. Розширювальні пристрої — електронні регулюючі вентилі (ЕРВ високого тиску) та електронні ТРВ на випарниках. Випарники — повітряні охолоджувачі в торгових шафах, гірках, прилавках, ларях та трьох холодильних камерах у зоні адміністрації. Гідромодуль утилізації тепла — циркуляційні насоси, акумулюючий бак ГВП (1000–1500 л), триходові регулюючі клапани, розширювальний бак, датчики температури та витрати. Система управління та захисту — центральний контролер (Danfoss AK-PC 782 або Carel pRack) з датчиками тиску, температури, витрати, датчиками витоку CO_2 та реле захисту.

Рис. 3.1.1. Принципова схема транскритичної CO_2 -бустерної системи з утилізацією тепла

					КРБ.ХУКП.1.499-03.1.3	Арк.
						30
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		



На рисунку 3.1.1 показано з'єднання всіх елементів:

Лінія всмоктування LT → LT-компресори → проміжний тиск → MT-компресори → теплообмінники утилізації → газ-кулер;

Лінія всмоктування MT → MT-компресори → теплообмінники утилізації → газ-кулер;

Пара з ресивера → паралельний компресор → теплообмінники утилізації → газ-кулер;

Рідина з ресивера → ЕРВ → випарники MT та LT; Гарячий CO₂ → теплообмінники утилізації → гідромодуль → споживачі тепла (повітря, ГВП, тепла підлога, завіси).

Таблиця 3.1.1 Основні параметри роботи системи

Параметр	Субкритичний режим ($T < +28^{\circ}\text{C}$)	Транскритичний режим ($T_{\text{зовн}} + 28 \dots + 35^{\circ}\text{C}$)	Експериментальний режим ($T_{\text{зовн}} > +35^{\circ}\text{C}$)
Тиск нагнітання, бар	45-85	90-115	115-130
Температура після компресора $^{\circ}\text{C}$	60-90	90-120	110-130
Температура виходу з газ-кулера $^{\circ}\text{C}$	30-40	35-43	38-48
COP (без утилізації)	4,0-5,6	2,8-3,4	2,4-2,8
COP (з утилізацією тепла)	4,8-5,6	3,5-4,2	3,0-3,5

Ефективність утилізації тепла, %	90-100	55-80	50-65
-------------------------------------	--------	-------	-------

Таблиця 3.1.2. Розподіл тепла утилізації за споживачами (орієнтовно для магазину 235–255 м²)

Споживач тепла	Температура теплоносія °С	Частка від загаль- ного тепла %	Потужність, кВт (середнє)
Підігрів приточного повітря	35-45	45-55	80-100
Гаряче водопостачання (ГВП)	50-55	25-35	45-70
Тепла підлога (зона кас, підсобні)	30-40	10-15	20-35
Теплові завіси на входах	40-50	10-15	20-35
Всього	-	100%	165-250 кВт

Опис роботи схеми

Субкритичний режим ($T_{\text{зовн}} < +28\text{ }^{\circ}\text{C}$)

CO₂ конденсується в теплообмінниках утилізації, тепло передається теплоносію, рідина надходить у ресивер, далі через ЕРВ до випарників. Утилізація тепла максимальна.

Транскритичний режим ($T_{\text{зовн}} +28...+35\text{ }^{\circ}\text{C}$)

Конденсація неможлива, газ охолоджується в теплообмінниках утилізації та газ-кулері. Паралельний компресор відводить частину пари з ресивера, що зменшує гідравлічний опір дроселя та підвищує ефективність на 15–25 %.

Екстремальний режим

($T_{\text{зовн}} > +35\text{ }^{\circ}\text{C}$) Активується повна потужність компресорів, максимальне адіабатичне зрошення газ-кулера. Утилізація тепла обмежена через високу температуру теплоносія

Висновок за розділом 3.1

					КРБ.ХУКП.1.499-03.1.3	Арк.
						32
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Принципова схема транскритичної CO₂-бустерної системи з утилізацією тепла, розроблена для компактного продовольчого супермаркету з торговими площами 235–255 м², є логічною та обґрунтованою відповіддю на кліматичні та експлуатаційні умови м. Одеса. Вона забезпечує надійне середньотемпературне (MT) та низькотемпературне (LT) охолодження для двох паралельних рядів торговельного обладнання, прилавків і камер зони ALMACEN, а також використовує відведене тепло конденсації для підігріву приточного повітря, гарячого водопостачання, теплої підлоги в зоні кас та теплових завіс на входах. Впровадження паралельного компресора та адіабатичного зрошення газ-кулера дозволяє ефективно працювати в транскритичному режимі в літній період, одночасно підвищуючи COP і зменшуючи витрати на електроенергію. Узгодження вибраної схеми з архітектурно-планувальним рішенням що, забезпечує компактність устаткування, зручність обслуговування та мінімізацію довжини трас хладагента. Отже, розроблена принципова схема транскритичної CO₂-бустерної системи з утилізацією тепла є оптимальним технічним рішенням для енергоефективного холодопостачання компактного супермаркету в м. Одеса, що сприяє зниженню експлуатаційних витрат, підвищенню енергетичного балансу об'єкта та відповідності сучасним вимогам екологізму та енергозбереження

3.2 Підбір компресорної станції (MT, LT, паралельний компресор).

Підбір компресорної станції для транскритичної CO₂-бустерної системи в компактному супермаркеті є одним з ключових етапів проектування, оскільки від правильного вибору типу, кількості та режиму роботи компресорів напряду залежать енергоефективність, надійність і життєвий цикл системи. Для схеми відповідно плану компресорна станція розглядається як цілісний технологічний блок, що об'єднує високотемпературний (MT), низькотемпературний (LT) і паралельний (бустер-) компресори, що забезпечує інтегроване холодопостачання для двох паралельних рядів торговельного обладнання та камер зберігання. Основою вибору компресорів є необхідність забезпечення холодопродуктивності, відповідної розрахунковим навантаженням MT- та LT-контурів при пікових та середніх режимах роботи. Для MT-контурів, які обслуговують вітрини, прилавки та дві середньотемпературні камери, використовуються компресори, розраховані на проміжний діапазон температур конденсації, характерний для транскритичного режиму CO₂. Для LT-контурів, які забезпечують замороження морозильних ларів, бонусів та однієї LT-камери, застосовуються компресори з підвищеною холодопродуктивністю при низьких температурах випаровування, що забезпечує стабільну роботу при –25...–28 °C. Паралельний компресор (бустер-компресор) є елементом, що критично впливає

					КРБ.ХУКП.1.499-03.1.3	Арк.
						33
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

на енергоефективність системи, особливо в літній період, коли тиск у газ-кулері зростає до 105–115 бар, а COP знижується. Паралельний компресор забезпечує зниження об'ємних витрат хладагента через ЕРВ, що сприяє зменшенню термодинамічних втрат і підвищенню коефіцієнта продуктивності (COP). Це дозволяє утримувати оптимальний режим роботи високотискового контуру, зменшуючи електроспоживання і забезпечуючи надійне холодопостачання. Для компактного супермаркету з торговими площами 235–255 м² рекомендується використовувати модульні компресорні станції з комбінацією МТ- та LT-компресорів, а також паралельного компресора, що дозволяє гнучко регулювати холодопродуктивність в залежності від сезонних коливань температури зовнішнього повітря. В залежності від обсягу навантаження, вибираються компресори з об'ємною продуктивністю, що забезпечує подачу необхідної кількості хладагента для охолодження товарів, а також резервування для уникнення перегрузок або збільшення тиску. Таким чином, підбір компресорної станції з урахуванням МТ-, LT- та паралельного компресора забезпечує оптимальний баланс між продуктивністю, енергоефективністю та надійністю системи, що відповідає вимогам експлуатації компактного супермаркету в місті Одеса та забезпечує високий рівень комфорту зберігання продуктів протягом року.

Принцип підбору компресорів:

МТ-контур — основне навантаження (88–86 % від загального). Підбирається 4 компресори з можливістю часткового завантаження (inverter або ступінчасте регулювання). LT-контур — менш потужний, підбирається 2 компресори. Паралельний компресор — обов'язковий для транскритичного режиму ($T_{\text{зовн}} > +25\text{ }^{\circ}\text{C}$), відводить 20–40 % пари з ресивера, що зменшує гідравлічний опір дроселя та підвищує ефективність на 15–25 %.

Таблиця 3.2.1 Підбір компресорів

Варіант	Кількість компресорів	Середньорічне споживання електроенергії, МВт*год	COP середньорічний	Річна економія електроенергії, %	Орієнтовна вартість комплектції, тис. грн	Переваги/недоліки

Без parallel compression	4 MT+2LT	185-220	2,9-3,2	-	650-750	Дешевше, але нижчий COP в літку
3 parallel compression (основний)	4MT+2LT+1 паралельний	150-180	3,5-4,2	18-22	780-880	Оптимальний баланс ціна/ефективність
Збільшення кількості MT	5MT+2LT	170-205	3,2-3,8	8-12	850-950	Кращий резерв, але дорожче

Таблиця 3.2.3 Розрахункова продуктивність компресора за місяцями

Місяць	Тзовн середня°С	MT-навантаження кВт	LT-навантаження кВт	Кількість працюючих MT-компресорів	Кількість працюючих LT-компресорів	Паралельний компресор (увм/вим)
Січень	+2,1	80-95	25-32	2-3	1	Вимкнено
Квітень	+11,5	100-115	28-36	3	1-2	Вимкнено
Липень	+24,3	135-160	33-42	4	2	Увімкнено
Серпень	+24,1	130-155	33-42	4	2	Увімкнено
Грудень	+4,0	85-100	26-34	2-3	1	Вимкнено

Аналіз підбору компресорів:

МТ-контур — основне навантаження (142–207 кВт). Вибрано 4 компресори Bitzer 4MT-20(K)-40P з можливістю часткового завантаження (ступінчасте регулювання). Один компресор резервний для забезпечення безперебійності в пікові години (17:00–21:00).

ЛТ-контур — менш потужний (18–34 кВт).

Вибрано 2 компресори Bitzer 4DSL-10K. Резерву не передбачено, оскільки навантаження ЛТ значно менше, а резерв забезпечується за рахунок МТ-контуру.

Паралельний компресор — обов'язковий елемент для Одеси (13–15 % часу транскритичний режим).

Вибрано Bitzer 4FTC-20K з продуктивністю 35–45 кВт. Він включається автоматично при $T_{\text{зовн}} > +25\text{ }^{\circ}\text{C}$ і відводить 20–40 % пари з ресивера, що зменшує гідравлічний опір дроселя та підвищує ефективність на 15–25 %.

Таблиця 3.2.4 Порівняння споживання електроенергії за варіантами комплектації

Варіант	Споживання електроенергії, МВт*год	Економія порівняно з базовим, МВт*год	Економія, тис.грн/рік (при 4 грн/кВт*год)	Термін окупності додаткових
Без parallel compression	185-220	-	-	-
3 parallel compression (основний)	150-180	35-40	140-160	1,0-1,4 року
Збільшена кількість МТ (5+2)	170-205	15-20	60-80	2,0-2,5 року

Висновок за підрозділом 3.2

Правильний підбір компресорної станції є вирішальним етапом проектування транскритичної CO₂-бустерної системи для компактного супермаркету в м. Одеса, оскільки саме він визначає загальну енергоефективність, надійність та довговічність системи холодопостачання. Вибір окремих компресорних груп для середньотемпературного (MT) і низькотемпературного (LT) контурів, а також встановлення паралельного (бустер-) компресора дозволяє сформувати гнучку та масштабовану систему, здатну ефективно працювати в широкому діапазоні експлуатаційних умов, зокрема при сезонних коливаннях зовнішньої температури та зміні холодових навантажень протягом року. Підбір MT-компресорів був здійснений з урахуванням оптимального режиму роботи в транскритичному діапазоні CO₂, де тиск у газ-кулері може досягати 105–115 бар у літній період. Вибрані компресори мають високу відповідність до типових об'ємних витрат хладагента, що забезпечує стабільну подачу холоду для двох паралельних рядів торговельного обладнання, прилавоків самообслуговування та середньотемпературних камер у зоні ALMACEN у діапазоні +2...+4 °C. В міжсезонні та зимові періоди система переходить у режим, близький до субкритичного, де MT-компресори працюють зі зниженим електроспоживанням, що підвищує COP і загальну енергоефективність.

Для LT-контурів, які обслуговують морозильні ларі, бонуси та одну низькотемпературну камеру з режимом –25...–28 °C, були вибрані компресори з підвищеною холодопродуктивністю при низьких температурах випаровування. Це забезпечує стабільний температурний режим для заморожених продуктів, навіть під час частого відкриття дверей та інтенсивного завантаження товарів. Встановлення LT-компресорів в окремому модулі дозволяє оптимізувати режим роботи системи, уникнути зайвого перенавантаження MT-сторони та забезпечити незалежне регулювання рівня холоду в LT-зонах, що особливо важливо для підтримки якості заморожених продуктів і відповідності вимогам технічних норм. Паралельний (бустер-) компресор відіграє вирішальну роль у підвищенні енергоефективності всієї CO₂-системи. Він призначений для

					КРБ.ХУКП.1.499-03.1.3	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		37

підйому тиску високотискового контуру до необхідного рівня, одночасно знижуючи об'ємні витрати хладагента через електричні розподільні вентиля (ЕРВ) і зменшуючи термодинамічні втрати в системі. Влітку, коли зовнішня температура зростає до +35 °С, паралельний компресор забезпечує стабільний режим роботи газ-кулера, знижує витрати електроенергії на компресорний блок і дозволяє утримувати високий COP навіть при значних пікових навантаженнях. В міжсезонні періоди він дозволяє плавно регулювати тиск у контурі, забезпечуючи економію електроенергії та зниження знос компресорного обладнання.

Комбінація MT-, LT- та паралельного компресорів у межах однієї компресорної станції забезпечує комплексне, взаємопов'язане управління холодопродуктивністю, що дозволяє оптимально розподілити навантаження між різними контурами відповідно до дійсних експлуатаційних умов. Вона також враховує вимоги стандартизованого управління (AS-інтерфейси, контролери, сигнали з САУ-системи), що забезпечує точну регуляцію тиску, температури та витрат хладагента, а також можливість діагностики та моніторингу стану системи в режимі реального часу. Отже, підбір компресорної станції для CO₂-бустерної установки у супермаркеті з двома паралельними рядами обладнання (1–32) та торговою площею 235–255 м² є обґрунтованим і технічно ефективним рішенням, яке відповідає вимогам надійності, енергоефективності та екологічної безпеки. Він дозволяє досягнути оптимального компромісу між холодопродуктивністю, електроспоживанням, довговічністю обладнання та високим рівнем комфорту зберігання продуктів, що робить таку систему найефективнішим варіантом для компактного супермаркету в місті Одеса

3.3. Газ-кулер з адіабатичним зрошення

Газ-кулер (gas cooler) є ключовим елементом транскритичної CO₂-бустерної системи холодопостачання, який у відмінність від традиційного конденсатора в фреонових установках охолоджує високотемпературний CO₂-газ не до температури конденсації, а до температури, максимально наближеної до температури зовнішнього повітря, зберігаючи його в транскритичному стані. Основна функція газ-кулера — приймати гарячий газ CO₂ після компресорів у

					КРБ.ХУКП.1.499-03.1.3	Арк.
						38
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

діапазоні 90–120 °С і охолоджувати його до температури виходу, що зазвичай на 3–8 °С вища за зовнішню температуру, забезпечуючи одночасно регулювання тиску в контурі та підтримку стабільного режиму роботи системи

У кліматичних умовах Одеси, де розрахункова літня температура зовнішнього повітря становить +35 °С, а реальні піки можуть досягати +39 °С, транскритичний режим роботи CO₂-системи відмічається приблизно 380–515 годин на рік. У цей період тиск у газ-кулері піднімається до 105–115 бар, що призводить до зростання електроспоживання компресорів і зниження коефіцієнта продуктивності (COP). Введення адіабатичного зрошення робить роботу газ-кулера істотно ефективнішою, оскільки випаровування тонкої плівки води на поверхні теплообмінника дозволяє значно підвищити відведення тепла без істотного збільшення електричної потужності вентиляторів. Для розрахункового літнього піку при зовнішній температурі +35 °С прийняті такі параметри газ-кулера: - теплова потужність — 180–220 кВт (з урахуванням МТ-навантаження 142–207 кВт, LT-навантаження 18–34 кВт та теплоти стиснення); - температура газу на вході — 90–110 °С (після високотискових компресорів); - температура газу на виході — без зрошення +38...+43 °С, а з включеним адіабатичним зрошенням — +33...+37 °С; - переохолодження рідини на рівні 5–8 К, щоб уникнути появи флеш-газу в ресивері, що підвищує ефективність роботи ЕРВ та запобігає перерозподілу хладагента; - витрата повітря — 12–18 тис. м³/год через вентилятори; - витрата води на адіабатичне зрошення — 0,5–1,2 л/хв, залежно від зовнішньої температури та відносної вологості.

Принцип роботи адіабатичного зрошення полягає в тому, що вода розпорошується форсунками на поверхні теплоіних трубок газ-кулера, утворюючи тонку мокру плівку, яка випаровується під впливом повітряного потоку. При випаровуванні вода поглинає значний обсяг теплоти пароутворення (приблизно 2260 кДж/кг), що охолоджує поверхню теплообмінника і дозволяє досягти температури виходу газу нижче, ніж температура сухого повітря. Це відповідає класичному принципу адіабатичного (евапоративного) охолодження, широко використовуваного в системах для CO₂ з метою зниження тиску нагнітання та підвищення енергоефективності.

Внаслідок використання адіабатичного зрошення відбувається: - зниження тиску нагнітання приблизно на 10–15 бар порівняно з режимом «сухого» охолодження; - підвищення COP системи в транскритичному режимі на 15–25%, що реалізується за рахунок зменшення об'ємних витрат компресора та зниження електроспоживання; - скорочення часу перебування системи в

					КРБ.ХУКП.1.499-03.1.3	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		39

екстремальних режимах, коли температура газу на виході з газ-кулера перевищує +40 °С, що шкідливо для ефективності та довговічності обладнання. Як конкретний варіант обрано компактний газ-кулер з адіабатичним зрошенням, наприклад серії Güntner GFM 090.2D або LU-VE HCE, які мають вбудовану систему розпорошення, високу тепловіддачу та можливість інтеграції з системами автоматики роботи CO₂-установки. Кожна секція газ-кулера оснащена 4 енергоефективними вентиляторами типу ЕС діаметром 910 мм із плавним регулюванням обертів, що дозволяє оптимально підбирати витрату повітря відповідно до зовнішніх умов і режиму роботи. Поверхня теплообміну газ-кулера прийнята на рівні 80–110 м², а сумарна потужність вентиляторів становить 3,5–5,0 кВт, що забезпечує надійний тепловідтік у пікові години при мінімальному електроспоживанні.

Система адіабатичного зрошення включає насос потужністю 0,55–0,75 кВт, трубопровідну обв'язку, форсунки з нержавіючої сталі та автоматизоване включення зрошення при перевищенні зовнішньої температури +28 °С та відносної вологості нижче приблизно 70%. Такий алгоритм управління дозволяє увімкнути зрошення саме в моменти, коли воно максимально ефективне, а відключити його при високій вологості або вранці/ввечері, коли температура нижча. Матеріал трубок газ-кулера вибирається з високотемпературних та високотискових сплавів — мідь або нержавіюча сталь, здатні витримувати робочі параметри CO₂ до 130 бар, що забезпечує безпеку та довговічність обладнання в умовах компактного супермаркету.

Отже, газ-кулер з адіабатичним зрошенням є не просто теплопоглинальним блоком, а елементом, який принципово підвищує енергетичну ефективність транскритичної CO₂-бустерної системи, забезпечуючи зниження тиску нагнітання, підвищення COP, а також зменшення часу роботи в екстремальних температурних режимах.

В умовах Одеси, де літні піки з температурою +35 °С і вище становлять суттєву частину року, такий підхід дозволяє значно зменшити електроспоживання, знизити викиди CO₂ від енергопостачання та забезпечити стабільний і надійний режим роботи системи протягом усього року.

Обрана модель газ-кулера: Güntner GFM 090.2D або LU-VE HCE серії з адіабатичним зрошенням

Кількість вентиляторів — 4 шт. ЕС Ø 910 мм (енергоефективні, з регулюванням обертів)

					КРБ.ХУКП.1.499-03.1.3	Арк.
						40
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Поверхня теплообміну — 80–110 м²

Потужність вентиляторів — 3,5–5,0 кВт

Система зрошення — насос 0,55–0,75 кВт, форсунки з нержавіючої сталі, автоматизоване включення при $T_{\text{зовн}} > +28\text{ }^{\circ}\text{C}$ та відносній вологості < 70
Матеріал трубок — мідь або нержавіюча сталь (для CO_2 високого тиску 130 бар).

Таблиця 3.3.1 Ефективність адіабатного зрошення

Тзов н $^{\circ}\text{C}$	Відносна вологість %	Твихід без зрошення $^{\circ}\text{C}$	Твихід зрошення $^{\circ}\text{C}$	Знищен ня тиску газ кулера, б ар	Зрошен ня COP системи %	Витра води на зрошен ня л/хв
+30	65-70	+38	+33	8-10	12-18	0,5-0,8
+35	60-75	+43	+35-37	12-15	18-25	0,8-1,2
+39	55-65	+48	+38-40	20-30	20-30	1,0-1,5

Таблиця 3.3.2 Порівняння варіантів газ-кулера для компактного супермаркету

Газ кулер	Поверхн я теплооб міну м2	Кількість вентолят орів	Потужні сть вентклят орів кВт	Зроше ння	Зниже ння	Зниже ння Твихід $^{\circ}\text{C}$	Економія електроен ергії %
Без зрошення (стандартний)	90-10	4ЕСØ 910	4,0-5,0	ні	-	-	-

З адіабатнимим зрошенням (основним)	80-100	4ЕСØ910	4,0-5,0	так	5-10	5-10	15-25
Збільшення поверхня+зрошення	120-140	5-6 ЕСØ 910	5,5-7,0	так	8-12	8-12	20-30

Таблиця 3.3.3 Розренок кономії електроенергії від адіабатного зрошення (за рік)

Період року	Кількість годин роботи	Середнє навантаження, кВт	Економія електроенергії без зрошення, МВт*год	Економія зрошення, МВт*год	Економія, тис грн/рік (при 4 грн/кВт*год)
Літо червень-серп	1500	180-220	-	25-40	100-160
Весна/осінь	5000	140-170	-	15-25	60-100
Зима	2260	110-130	-	5-10	20-40
Всього	8760	134-162	-	45-75	180-300 тис грн/рік

Висновок за підрозділом 3.3

Газ-кулер з адіабатичним зрошенням є ключовим елементом, що визначає енергетичну ефективність транскритичної CO₂-бустерної системи холодопостачання компактного супермаркету в м. Одеса. В умовах, де літні піки з температурою зовнішнього повітря +35 °С і вище становлять порядку 380–515 годин на рік, він відіграє вирішальну роль у підтримці робочого режиму системи, зниженні тиску нагнітання та підвищенні коефіцієнта продуктивності (COP). Відрізняючись від традиційного конденсатора, газ-кулер охолоджує CO₂-газ не до стану конденсації, а до температури, максимально

наближеної до температури навколишнього повітря, а адіабатичне зрошення робить цей процес ще ефективнішим за рахунок випаровування води на поверхні теплообмінника. При розрахунковому літньому піку теплова потужність газ-кулера складає 180–220 кВт, відповідно до сумарного навантаження МТ (142–207 кВт), ЛТ (18–34 кВт) та теплоти стиснення, а температура газу на вході досягає 90–110 °С. В режимі з «сухим» охолодженням температура виходу газу перебуває в діапазоні +38...+43 °С, що відповідає високому рівню тиску в контурі; при вмиканні адіабатичного зрошення ця температура знижується до +33...+37 °С, а тиск нагнітання знижується на 10–15 бар. Це безпосередньо призводить до підвищення COP на 15–25% у транскритичному режимі, що відповідає значній економії електроенергії, підтвердженої в дослідженнях і промислових проектах з адіабатичними CO₂-системами. Принцип роботи адіабатичного зрошення полягає в нанесенні тонкої плівки води на поверхню теплоізоляційних трубок, де вона випаровується, відбираючи значну кількість теплоти пароутворення (приблизно 2260 кДж/кг). В результаті температура поверхні теплообмінника опускається нижче, ніж у випадку «сухого» охолодження, що дозволяє знизити температуру виходу газу, покращити переохолодження рідини на 5–8 К та уникнути появи флеш-газу в ресивері, що позитивно впливає на стабільність роботи електричних розподільних вентилів і ефективність усієї CO₂-системи. Витрата повітря через газ-кулера становить 12–18 тис. м³/год, а витрата води на зрошення — 0,5–1,2 л/хв, залежно від зовнішньої температури та відносної вологості, що дозволяє досягти компромісу між енергоефективністю та витратами на воду. Обрана модель газ-кулера (наприклад, серії Güntner GFM 090.2D або LU-VE HSE з адіабатичним зрошенням), оснащена 4 вентиляторами ЕС діаметром 910 мм, забезпечує високу тепловіддачу (80–110 м² теплообмінної поверхні) при відносно невисокій сумарній потужності вентиляторів 3,5–5,0 кВт. Автоматизована система зрошення з насосом 0,55–0,75 кВт і форсунками з нержавіючої сталі включається при зовнішній температурі вище +28 °С та відносній вологості нижче 70%, що оптимізує використання води та запобігає накопиченню солей на поверхні теплообмінника. Використання міді або нержавіючої сталі для трубок газ-кулера гарантує можливість його роботи при робочому тиску до 130 бар, що забезпечує безпеку та довговічність обладнання. Таким чином, впровадження газ-кулера з адіабатичним зрошенням в транскритичній CO₂-бустерній системі є технічно обґрунтованим і економічно ефективним рішенням. Він дозволяє істотно знизити електроспоживання, підвищити надійність системи, скоротити час перебування в екстремальних режимах (температура виходу газу понад +40 °С) і сприяє переходу до більш енергоефективного, нерідко підкритичного режиму роботи газ-кулера.

					КРБ.ХУКП.1.499-03.1.3	Арк. 43
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

В умовах клімату Одеси це створює передумови для суттєвої економії енергії, зниження експлуатаційних витрат та відповідності сучасним вимогам щодо енергоефективності, екологічної безпеки та стабільного температурного режиму зберігання товарів у супермаркеті протягом усього року.

3.4. Розрахунок та підбір системи утилізації тепла

Система утилізації тепла конденсації є ключовим елементом енергоефективності транскритичної CO₂-бустерної установки, оскільки саме вона перетворює відведений тепловий потік з високотискового контуру в корисну енергію для інших потреб об'єкта. Відбір тепла відбування перед газ-кулером, у точці, де гарячий газ CO₂ має температуру 90–120 °C після компресорів, дозволяє передати значну частину відведеної теплоти теплоносію (воді або водно-гліколевому розчині 30–35%) для підігріву приточного повітря, гарячого водопостачання (ГВП), підігріву теплої підлоги в касовій зоні та підживлення теплових завіс на входах у супермаркет. Принципова схема системи утилізації передбачає встановлення реверсивного теплообмінника (пластинчастого або кожухотрубного типу) між високотисковою лінією гарячого газу CO₂ та замкненим контуром низькотемпературного теплоносія. Теплоносієм, як правило вода або водно-гліколь з вмістом 30–35% гліколю, циркулює ринтрі, яка відбирає його від контурів опалення, ГВП, підігріву повітря та інших джерел потреб. Після відбору тепла від гарячого CO₂ теплообмінника, теплоносієм направляється до відповідних вузлів споживання, де віддає теплоту, а потім повертається до вузла підігріву для наступного циклу. Для супермаркету з піковим холододовим навантаженням MT 142–207 кВт та LT 18–34 кВт, загальна теплова потужність, яка теоретично доступна для утилізації, становить порядку 180–220 кВт, або до 100–120% від холодопродуктивності системи в залежності від режиму роботи. В реальних умовах частина цього тепла відводиться безпосередньо в зовнішнє середовище через газ-кулер, але значну частину (до 70–90% в зимовий період) можна відбирати через теплообмінник утилізації. В типових проектах бустерних CO₂-систем з утилізацією тепла реалізують економію порядку 30–40% від опалювальних витрат об'єкта, що є суттєвим показником енергозбереження. При розрахунку системи утилізації тепла важливо врахувати температурні межі як з боку CO₂, так і з боку теплоносія. На вході до теплообмінника температура газу CO₂ становить 90–120 °C, а на виході після відбору тепла, перш ніж він надходить до газ-кулера, може бути знижена до 40–60 °C, що дозволяє зберегти високий температурний напор теплопередачі. З боку теплоносія прийнятні температурні межі, типові для систем водяного опалення та ГВП: підігріття приточного повітря — 35–50 °C, ГВП — 45–60 °C, теплої підлоги та теплових

					КРБ.ХУКП.1.499-03.1.3	Арк.
						44
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

завіс — 30–45 °С. Відповідно до цих параметрів розраховують середній температурний напір ЛТН, необхідну площу теплообмінної поверхні та витрати теплоносія, щоб забезпечити ефективну передачу тепла без перетіпання або недоварювання. Вибір теплообмінника утилізації здійснюється з урахуванням високих тисків CO₂ (до 130 бар у високотисковому контурі) та можливого циклічного навантаження, що відповідає роботі CO₂-системи протягом року. Зазвичай обирають високотискові пластинчасті теплообмінники зі сталевими пластинами (наприклад, серії типу gasketed plate heat exchanger, розраховані на 15–30 бар з боку теплоносія, але з можливістю додаткового фланцевого включення в лінію CO₂ через спеціальні адаптери) або вузькопірамідальні кожухотрубні апарати з тонкостінними трубками, здатними витримувати робочий тиск до 120–150 бар. Важливим чинником є матеріал теплообмінної поверхні: для CO₂ з тисками до 130 бар застосовують нержавіючу сталь типів AISI 304/316, які відповідають вимогам механічної міцності та корозійної стійкості. Контур теплоносія в системі утилізації тепла проектується як герметична замкнена мережа з циркуляційними насосами, баками-акумуляторами (при наявності ГВП), арматурою та засобами автоматики. В залежності від режиму роботи CO₂-системи використовують байпасні лінії для прямування частини гарячого газу мимо теплообмінника, коли витрати тепла від об'єкта тимчасово знижуються, або коли відбувається режим зниженого опалення (наприклад, в міжсезоння). Такі байпаси забезпечують стабільний тиск в контурі CO₂ та відбій від перегріву теплообмінника, а також дозволяють підтримувати оптимальний температурний режим як на стороні хладагента, так і на стороні теплоносія. В даному супермаркеті система утилізації тепла має забезпечити, принаймні, часткове заміщення газового котла або електрообігрівачів, спрямованих на підігрів приточного повітря, ГВП, теплої підлоги та теплових завіс. Відбір тепла з газу CO₂ з температурою 90–120 °С дозволяє досягти високих температур теплоносія, що відповідає вимогам систем ГВП та підігріву повітря в періоди низьких зовнішніх температур, коли відведений тепловідтік від газ-кулера може досягати максимальних значень. В результаті значно знижуються витрати на газове або електричне опалення, а CO₂-система виступає не лише як джерело холоду, а й як основне джерело тепла для об'єкта протягом значної частини року. Таким чином, розрахунок та підбір системи утилізації тепла для транскритичної CO₂-бустерної установки є технічно обґрунтованим шляхом до підвищення енергоефективності, оскільки вона відбирає значну частину відведеного тепла конденсації та використовує його для потреб опалення, вентиляції та гарячого водопостачання супермаркету. Вірне визначення температурних напорів, вибір відповідного типу теплообмінника, забезпечення герметичності та регулювання контуру

					КРБ.ХУКП.1.499-03.1.3	Арк.
						45
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

теплоносія дозволяють досягти високого рівня рекуперації тепла, що відповідає сучасним вимогам енергозбереження та екологічної безпеки. У місті Одеса, де зимовий та міжсезонний періоди характеризуються помірними, але достатньо низькими зовнішніми температурами, така система стає не просто додатковим елементом, а ефективним інтегрованим рішенням, що значно підвищує загальний теплозберіжний потенціал об'єкта.

Таблиця 3.4.1. Річний баланс утилізованої енергії (розрахунок для Одеси)

Період	Години роботи	Середня Q _{ути} кВт	Енергія МВт*год	Енергія, ГДж	Заміщення газу, тис м ³ /рік
Літо	1500	140	210	756	22-25
Весна/осінь	5000	178	890	3204	93-105
Зима	2260	199	450	1620	47-53
Всього	8760	-	1550 МВт*год	5580 ГДж	162-183 тис м ³ /рік

Таблиця 3.4.2. Економічна ефективність утилізації тепла

Показник	Значення	Розрахунок/примітка
Заміщення природного газу	162-183 тис м ³ /рік	При 15 грн/м ³
Економія на опалення/ГВП	320-380 тис. грн/рік	-
Економія електроенергії на опалення	130-190 МВт*год/рік	При 4 грн/кВт*год
Загальна річна економія	440-520 тис. грн/рік	-

Підбір обладнання утилізації тепла:

Теплообмінники — 3 шт. пластинчастих Alfa Laval M10-BFM або SWEP B649 (загальна потужність 180–220 кВт, тиск до 25 бар з боку води).

Циркуляційні насоси — Grundfos Magna3 40-180F (2 робочих + 1 резервний, потужність 1,5–2,2 кВт, з частотним регулюванням).

Акумуляуючий бак ГВП — 1000–1500 л (нержавіюча сталь, з електропідігрівом 6–9 кВт для пікових навантажень).

Триходові регулюючі клапани — Danfoss AME 435 + AVQM (DN 40–50, з електроприводом).

					КРБ.ХУКП.1.499-03.1.3	Арк. 46
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Розширювальний бак — 200–300 л (закритого типу, тиск 3–4 бар).

Таблиця 3.4.3. Підбір теплообмінників утилізації

№	Потужність, кВт	Тип модель	Кількість пластин	Площа теплобміну м2	Матеріал	Тиск з боку CO ₂ / води, бар
1	80-100	Alfa Laval M10-BFM	60-80	15-20	AISI 316	
2	60-80	Alfa Laval M10-BFM	50-70	12-18	AISI 316	130/16
3	40-60	SWEP B649	40-60	10-15	AISI 316	130/16
В с ь о г о	180-240	-	-	37-53	-	130/16

Таблиця 3.4.4 Рекомендації щодо пріоритетів утилізації тепла

№	Споживач тепла	Температура теплоносія °C	Потужність кВт	Сезон використання	Примітка
1	Підігрів приточного повітря	35-45	80-110	Весь рік	Найвищий пріоритет
2	Гаряче водопостання	50-55	45-70	Весь рік	Санітарні норми
3	Тепла підлога (зона підсобні)	30-40	20-35	Зима	Економія електроенергії
4	Теплові завіси на входах	40-50	20-35	Зима	Зниження інфільтрації

Висновок за підрозділом 3.4

Розроблена та розрахована система утилізації тепла конденсації для транскритичної CO₂-бустерної установки є не просто додатковим елементом, а одним із головних факторів, що забезпечує високий рівень енергоефективності системи холодопостачання супермаркету в м. Одеса. Відбір тепла від гарячого CO₂-газу з температурою 90–120 °С перед газ-кулером та його передача теплоносію (воді або водно-гліколевому розчині 30–35%) дозволяє використовувати відведений тепловідток для потреб будівлі: підігріву приточного повітря, гарячого водопостачання (ГВП), теплового підлогопідігріву в касовій зоні та функціонування теплових завіс на входах. Це перетворює холодильну установку з одного джерела холоду на комплексну систему, яка одночасно забезпечує охолодження товарів і підігрів повітря та води, значно знижуючи необхідну площу зовнішніх джерел тепла. Проведений розрахунок показує, що при піковому холодовому навантаженні 180–220 кВт система утилізації тепла може відбирати значну частину відведеного тепла, особливо в зимовий і міжсезонний періоди, коли зовнішня температура знижується, а відведений тепловідток від газ-кулера залишається високим. В таких умовах до 70–90% відведеної теплоти може передаватися теплоносію, що відповідає суттєвій економії енергії на опалення та ГВП, а в деяких проектах таких систем отримують зниження опалювальних витрат на 30–40%. Відповідно, впровадження системи утилізації тепла сприяє формуванню закритого теплового балансу об'єкта, де частина відведених енергій від холодильної системи повертається назад для потреб опалення, вентиляції та ГВП. Вибір теплообмінника, контурів теплоносія, арматури та автоматики виконаний з урахуванням високих робочих тисків CO₂ (до 130 бар), температурних напорів та вимог надійності, що характерно для транскритичних CO₂-систем. Використання високотискових пластинчастих або кожухотрубних теплообмінників з нержавіючої сталі забезпечує міцність, корозійну стійкість та довговічність, а байпасні лінії та регульовальні вузли дозволяють точно керувати відбором тепла, підтримуючи стабільний режим роботи як CO₂-контур, так і контурів опалення. Такий підхід відповідає рекомендаціям провідних виробників CO₂-систем щодо використання рекуперації тепла як одного з ключових напрямів підвищення енергоефективності в торгівлі. Отже, система утилізації тепла конденсації, запроектована для транскритичної CO₂-бустерної установки, є технічно обґрунтованим, економічно ефективним та екологічно безпечним рішенням. Вона дозволяє значно підвищити загальний енергетичний баланс супермаркету, знизити витрати на енергоносії, відповідати вимогам енергозбереження та віддалено замінювати або повністю відмовитися

					КРБ.ХУКП.1.499-03.1.3	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		48

від окремих джерел тепла, таких як газові котли або електрообігрівачі. В кліматичних умовах м. Одеса, з її помірно континентальним кліматом, така система стає необхідним елементом сучасного проєкту енергоефективної системи холодопостачання, яка одночасно забезпечує високий рівень комфорту зберігання продуктів і нижчі операційні витрати на весь життєвий цикл об'єкта

3.5. Автоматика та управління

Система автоматики та управління є найважливішим елементом транскритичної CO₂-бустерної установки, оскільки саме вона забезпечує стабільну, безаварійну та максимально енергоефективну роботу системи при високих робочих тисках до 130 бар, зміні зовнішніх температур та різних режимах навантаження. В компактному продовольчому супермаркеті з торговими площами 235–255 м² і загальним холодним навантаженням 160–241 кВт автоматизована система керування необхідна для плавного перемикавання між субкритичним і транскритичним режимами, оптимального управління роботою паралельного (бустер-) компресора, регулювання адіабатичного зрошення газ-кулера, а також для пріоритетного використання тепла утилізації та надійного захисту всіх елементів CO₂-контурів. Для даного об'єкта обрано промислову систему управління на базі мікропроцесорного контролера Danfoss AK-PC 782 як основний варіант, а в якості альтернативи — контролер Carel pRack. Обидва пристрої спеціалізовані під CO₂-бустерні системи, мають попередньо вбудовані алгоритми роботи для паралельного компресора, адіабатичного зрошення газ-кулера, пріоритету утилізації тепла та залежної від зовнішньої температури регуляції тиску в контурі, що значно спрощує настройку, запуск і сервіс. Вони відрізняються високою надійністю, зручним графічним інтерфейсом, модульною будовою та підтримкою багатьох протоколів зв'язку, що дозволяє інтегрувати CO-2-систему до центральної системи будівельної автоматики (САУБ). Основними функціями автоматики є регулювання оптимального тиску в контурі газ-кулера за формулою $p_{opt} = 2,7 T_{зовн} + 8,5$ бар, що дозволяє динамічно змінювати рівень нагнітання відповідно до зовнішніх умов, мінімізуючи електроспоживання при одночасному збереженні необхідної холодопродуктивності. При температурі зовнішнього повітря вище +25 °C контролер автоматично включає паралельний компресор, що забезпечує підйом тиску, рівномірну роботу високотискового контуру та зниження об'ємних витрат через ЕРВ, а при спаді температури — відключає його для запобігання перетискам і недоцільному витраті енергії. Автоматика також керує адіабатичним зрошенням газ-кулера, включаючи насос та подачу води на форсунки при перевищенні заданої температури газу на виході, а також з урахуванням відносної вологості повітря, що забезпечує

					КРБ.ХУКП.1.499-03.1.3	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		49

використання зрошення лише в економічно вигідних умовах. Система пріоритетно використовує тепло утилізації за рахунок перемикання триходових клапанів контуру теплообмінника: коли є потреба в теплі (опалення, ГВП, тепле підлога, теплові завіси), гарячий газ CO₂ спрямовується спочатку на відбір тепла, а надлишок — далі на газ-кулер, а в режимі низької тепловіддачі частина газу може минає утилізуючий теплообмінник, щоб не знижувати рівень тиску нижче необхідного. Система автоматики реалізує комплексний захист CO₂-установки: контроль високого та низького тиску, відстеження можливостей витoku CO₂ за допомогою газоаналізаторів, моніторинг перегріву компресорів, рівня оливи, перепадів тиску від переохолоджувача та відходів від заданих режимів. При виникненні аварійної ситуації контролер аварійно відключає компресори, включає сигналізацію, блокує подачу хладагента та може ініціювати вентиляцію технічного приміщення. Крім того, автоматика забезпечує моніторинг і диспетчеризацію через стандартні протоколи Modbus RTU/TCP, BACnet та веб-інтерфейс, що дозволяє відстежувати в реальному часі тиск, температуру, витрати в різних контурах, електроспоживання компонентів, а також обсяг утилізованого тепла. Дані логуються в архів контролера, що надає можливість аналізувати енергетичні показники, виявляти відхилення, планувати профілактичне обслуговування та демонструвати економічний ефект від використання CO₂-бустерної установки з утилізацією тепла протягом року. Таким чином, система автоматики та управління є «мозком» транскритичної CO₂-бустерної установки, яка забезпечує не лише безпеку, а й максимальну енергоефективність, гнучке реагування на зміни режиму роботи, легку інтеграцію до загальної інфраструктури будівлі та зручне оперативне управління з єдиного центру диспетчеризації.

Важливим елементом системи автоматики є алгоритм оптимізації режимів роботи CO₂-установки, особливо в умовах змінного навантаження протягом доби та року. Він враховує не лише зовнішню температуру, а й обсяг доставки товарів до супермаркету, графіки завантаження МТ- та LT-камер, а також графік відвідування та витрати вентиляції. Контролер (Danfoss AK-PC 782 або Carel pRack) на основі цих даних формує програму роботи компресорів — змінюючи їх кількість, ступінь включення, режими паралельного компресора та режим роботи відповідно до вимог уникнення частотних перемикачів, що знижують ресурс обладнання. Це дозволяє плавно регулювати холодопродуктивність, уникати переохолодження приміщень і зменшувати перепади тиску, що сприяє стабільному температурному режиму зберігання продуктів. Автоматика також відповідає за координацію роботи всіх елементів системи утилізації тепла. При виникненні потреби в опаленні чи гарячому

					КРБ.ХУКП.1.499-03.1.3	Арк.
						50
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

водопостачанні контролер відкриває відповідні триходові клапани, забезпечує протікання теплоносія через теплообмінник, відбір тепла від гарячого газу CO₂, а потім направляє його до відповідних контурів (опалення, підігрів приточного повітря, підігрів теплої підлоги, теплові завіси). У разі, коли об'єм доступного тепла перевищує поточні потреби, система автоматично відновлює частину тепла до газ-кулера, щоб уникнути надлишкового зниження тиску в контурі. В послідовних режимах роботи можлива зміна пріоритету: при відсутності необхідності в опаленні частина тепла може бути відведена безпосередньо в газ-кулер, а під час відсутності витрати від утилізаційного контуру — зупинити насос циркуляції теплоносія, зберігаючи енергетичний баланс систем. Система, крім того, забезпечує повний діагностичний і сервісний контроль. Всі критичні параметри (температури в точках вхід/вихід, тиску, рівнів оливи, електроспоживання компресорів, вентиляторів, насосів адіабатичного зрошення, обсягів утилізованого тепла) відстежуються та фіксуються в журналі подій контролера, а також передаються через Modbus RTU/TCP, BACnet на центральний диспетчерський центр або вбудовані віб-інтерфейси. Це дозволяє не лише моніторити роботу системи в режимі реального часу, а й аналізувати історичні дані для оцінки енергоефективності, виявлення періодів підвищеного споживання енергії, планування технічного обслуговування, а також для ведення звітів енергетичного менеджменту та відповідності вимогам сертифікацій (наприклад, ISO 14001, ISO 50001). Важливим аспектом роботи автоматики є можливість віддаленої модерації. Віддалені оператори можуть керувати режимами роботи, змінювати рівні налаштувань, отримувати сповіщення про аварії через e-mail, SMS або веб-застосунки, що забезпечує швидку реакцію на відхилення, мінімальний час простою системи та підвищену надійність. Керування віддаленою відповідно до встановлених інструкцій дозволяє впровадити програми попередньої адаптації режимів, наприклад, готування системи до пікових відвідувань (напередні підготовка до акцій або закриття магазину), що підвищує оперативність та стабільність роботи. Отже, система автоматики та управління не лише забезпечує безпеку, стабільність та ефективність транскритичної CO₂-бустерної установки, але й дозволяє інтегрувати її в енергетичний менеджмент супермаркету, сприяючи зниженню витрат, підвищенню автоматизації та відповідальності до сучасних вимог енергоефективності та екологічної безпеки. Відповідно, впровадження сучасної автоматизованої системи управління є одним із ключових факторів успішного функціонування CO₂-бустерної установки в компактному супермаркеті з двома паралельними рядами обладнання та активним режимом роботи протягом року.

					КРБ.ХУКП.1.499-03.1.3	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		51

Висновок за підрозділом 3.5

Система автоматики та управління, запроектована для транскритичної CO₂-бустерної установки в компактному супермаркеті, є не просто допоміжним елементом, а «інтелектуальним ядром» всієї системи холодопостачання. Вона забезпечує стабільну, безпеку та енергоефективну роботу при високих робочих тисках CO₂ (до 130 бар), динамічно реагуючи на зміни зовнішньої температури, коливання холодових навантажень та потреби в теплі. Використання професійних контролерів Danfoss AK-PC 782 або Carel pRack з вбудованими алгоритмами для паралельного компресора, адіабатичного зрошення газ-кулера та пріоритету утилізації тепла дозволяє досягти оптимального співвідношення між холодопродуктивністю, електроспоживанням та рівнем відведення тепла, що є ключовим для економічної ефективності об'єкта. Автоматика відіграє вирішальну роль у плавному перемиканні між субкритичним і транскритичним режимами, а також в регулюванні оптимального тиску в контурі газ-кулера за формулою $p_{opt} = 2,7 T_{зовн} + 8,5 \text{ бар}$, в автоматичному включенні/виключенні паралельного компресора при відповідних зовнішніх температурах, а також в управлінні адіабатичним зрошенням і відбором тепла утилізації. Вона відповідає за безперебійний захист системи від аварійних ситуацій: відстеження високого і низького тиску, витоків CO₂, перегріву компресорів, а також забезпечує моніторинг і логування всіх ключових показників (тисків, температур, витрат, електроспоживання, утилізованого тепла). Додатково автоматика забезпечує інтеграцію з центральною системою будівельної автоматики через стандартизовані протоколи Modbus RTU/TCP, BACnet та віб-інтерфейси, що дозволяє дистанційно керувати режимами роботи, відстежувати стан обладнання та отримувати сповіщення про відхилення. Це підвищує надійність, зменшує витрати на сервіс та дозволяє проводити аналіз енергетичних показників для подальшої оптимізації. Таким чином, система автоматики та управління представляє собою комплексне, високоефективне рішення, яке забезпечує не лише безпека та стабільність роботи CO₂-бустерної установки, але й значний внесок у загальну енергоефективність супермаркету, відповідність сучасним вимогам енергозбереження та екологічної безпеки. Вона стає важливим елементом сучасного енергоефективного холодопостачання, який дозволяє отримати високий рівень комфорту зберігання продуктів при мінімальних експлуатаційних витратах.

3.6. Гідравлічний розрахунок трубопроводів Гідравлічний розрахунок трубопроводів для транскритичної CO₂-бустерної установки виконано з урахуванням вимог ДСТУ EN 378-2:2018, рекомендацій виробників обладнання Bitzer та Danfoss, а також вітчизняних норм ДБН В.2.5-20:2018 щодо

					КРБ.ХУКП.1.499-03.1.3	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		52

проектування систем холодопостачання. Метою розрахунку є визначення оптимальних внутрішніх діаметрів трубопроводів, забезпечення допустимих швидкостей руху CO₂ в лініях всмоктування, нагнітання, рідини та зворотного газу, а також мінімізація втрат тиску та вібрацій при робочих параметрах, де тиск може досягати 130 бар. Вихідні дані для розрахунку базуються на піковому літньому режимі роботи компактного супермаркету за планом PLANTA A-1 з торговими плоями 235–255 м². Загальне холодове навантаження в піковий момент прийнято в діапазоні 160–241 кВт, з розподілом між середньотемпературним контуром МТ (142–207 кВт) і низькотемпературним контуром ЛТ (18–34 кВт). Масова витрата CO₂ у високотисковому контурі при максимальному режимі становить приблизно 0,72 кг/с, що відповідає реальним значенням для систем середнього розміру зі схожими параметрами навантажень. Для транскритичного режиму прийняті такі граничні тиски: тиск нагнітання високотискового контуру — 105–115 бар, тиск всмоктування на стороні МТ — 28–32 бар, а на стороні ЛТ — 12–15 бар. Ці значення використовуються як розрахункові при визначенні об'ємних витрат газу в лініях, необхідних для підбору діаметрів та визначення втрат тиску. Орієнтовна довжина основних трас складає 35–45 м (від компресорної станції до газ-кулера та від газ-кулера до випарників МТ і ЛТ), що враховано при підборі тривалості та конфігурацій головних магістралей. При виборі діаметрів труб проводився аналіз необхідної швидкості потоку CO₂ в лініях: для газових ліній всмоктування та нагнітання дотримуються значення швидкості в діапазоні 8–16 м/с, а для рідинних ліній — 0,5–1,5 м/с, що відповідає рекомендаціям EN 378 та виробників обладнання. Занадто висока швидкість призводить до значних втрат тиску, підвищення пульсацій, а також до ерозії внутрішніх поверхонь труб, зокрема в зонах високих тисків; занадто низька — до зростання об'ємних габаритів трас та додаткових витрат матеріалу. Для CO₂-систем з високим робочим тиском до 130 бар використовуються високоміцні сталеві або мідні труби, які відповідають вимогам механічної міцності та герметичності. В результаті гідравлічного розрахунку були визначені внутрішні діаметри труб для окремих ліній: всмоктування ЛТ, всмоктування МТ, лінія нагнітання CO₂, лінія рідкого CO₂ від газ-кулера до ресивера, а також магістралі розподілу рідини між випарниками. Втрати тиску в трасах зведено до мінімуму: для газових ліній — до 1–3 бар на 100 м (в залежності від діаметру та швидкості), для рідинних — до 0,1–0,3 бар/10 м, що забезпечує ефективну роботу компресорів, електричних розподільних вентилів та відповідну подачу хладагента до вітрин та камер. Додатково враховувалися місцеві опори (відводи, трійники, запірно-регулююча арматура, фільтри-осушники), які вносять додаткові втрати тиску, а також потрібно дотримуватися правил прокладки

					КРБ.ХУКП.1.499-03.1.3	Арк.
						53
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

трубопроводів: мінімізація кількості різких поворотів, забезпечення плавних переходів, встановлення опор, компенсаторів розширення та відривід газу в верхніх точках, щоб уникнути утворення газових пробок у рідинних лініях. Отже, гідравлічний розрахунок трубопроводів забезпечує надійну, енергоефективну та довготривалу роботу СО₂-бустерної системи, враховуючи високі робочі тиски, максимальні масові витрати хладагента та специфіку компактного супермаркету у м. Одеса. Правильний підбір діаметрів та конфігурації трас дозволяє зберегти високий рівень холодопродуктивності, знизити втрати тиску, уникнути вібрацій і зношування обладнання, а також відповідає сучасним вимогам енергозбереження та безпеки при експлуатації системи з високим тиском

Таблиця 3.6.1. Розрахункові параметри трубопроводів

Лінія	Витрата маси, кг/с	Рекомендована швидкість, м/с	Діаметр внутрішній мідь мм	Матеріал	Падіння тиску на 40м, бар	Примітка
Нагнітання високий тиск	0,72	8-12	54*2,0	Мідь або нерж AISI 304	1,8-2,4	Найвищий тиск
Всмоктування МТ	0,65	20-25	42*1,5/54*1,5	Мідь	0,8-1,2	Газова фаза
Всмоктування LT	0,18	25-35	28*1,5	Мідь	0,6-0,9	Газова фаза
Рідина лінія (від ресивира)	0,72	0,8-1,2	22*1,5	Мідь	0,3-0,5	Рідка фаза
Лінія утилізації тепла (вода)	2,4-5,5 л/с	1,0-1,5	40-50	Сталь оцинкована PPR	0,4-0,7	Гідромодуль

Таблиця 3.6.2. Детальний гідравлічний розрахунок

Лінія	Діаметр,мм	Швидкість м/с	Густина кг/м ³	Коефіцієнт f	ΔP на 40 м, бар	Допустиме ΔP , бар	Висновок
Нагнітання	54	10,2	180-220	0,018	2,1	$\leq 3,0$	Прийнято
Всмоктування МТ	24	23,5	55-65	0,022	1,05	$\leq 1,5$	Прийнято
Всмоктування LT	28	31,8	28-35	0,024	0,85	$\leq 1,5$	Прийнято
Рідина лінія	22	1,05	850-920	0,019	0,42	$\leq 0,8$	Прийнято

Таблиця 3.6.3. Порівняння варіантів діаметрів трубопроводів

Лінія	Мінімальний	Оптимальний	З запасом	Економія матеріалу
Нагнітання	60мм	54мм	64мм	18%
Всмоктування МТ	54мм	42мм	54мм	22%
Всмоктування LT	35мм	28мм	35мм	25%
Рідина лінія	28мм	22мм	28мм	20%

Висновок за підрозділом 3.6

Гідравлічний розрахунок трубопроводів для транскритичної CO₂-бустерної установки допоміг обґрунтувати вибір оптимальних діаметрів магістралей, що забезпечує допустимі швидкості потоку CO₂, мінімальні втрати тиску та високу механічну міцність трас при робочих параметрах до 130 бар. Врахування зовнішніх довжин трас (35–45 м від компресорної станції до газ-кулера та відповідних випарників), масових витрат хладагента (~0,72 кг/с), тисків нагнітання (105–115 бар) та всмоктування (МТ — 28–32 бар, LT — 12–15 бар) дозволило сформулювати раціональну схему прокладки труб, що відповідає вимогам ДСТУ EN 378-2:2018 та рекомендаціям виробників обладнання Bitzer

					КРБ.ХУКП.1.499-03.1.3	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		
						55

та Danfoss. Отримані в результаті розрахунку діаметри труб для газових і рідинних ліній зведено до мінімуму втрат тиску, забезпечили повну подачу хладагента до вітрин та камер без створення газових пробок і підвищеної вібрації, а також відповідають нормам механічної міцності та безпеки. Використання високоміцних матеріалів (сталі або міді), плавних переходів, мінімізація різких поворотів та встановлення опор та компенсаторів дозволяє забезпечити надійну та довготривалу роботу системи в умовах компактного супермаркету з двома паралельними рядами обладнання. Отже, гідравлічний розрахунок трубопроводів є ефективним і технічно обґрунтованим рішенням, яке забезпечує високий рівень енергоефективності, стабільність роботи CO₂-бустерної установки, зниження втрат тиску та відповідає сучасним вимогам енергозбереження та безпеки при експлуатації системи з високим тиском. Він дозволяє створити надійний, екологічно безпечний і енергоефективний холодопостачальний комплекс для супермаркету, який відповідає сучасним стандартам холодильної техніки та вимогам енергетичного менеджменту.

3.7. Заходи безпеки та захисту

Система безпеки та захисту є обов'язковою складовою транскритичної CO₂-бустерної установки, оскільки CO₂ працює при відносно високому тиску (до 130 бар у високотисковому контурі), а в разі витоку газ може накопичуватися в закритих приміщеннях, знижуючи концентрацію кисню і створюючи ризик асфіксії для персоналу та відвідувачів. У компактному супермаркеті, де компресорна станція розташована в машинному відділенні біля зони ALMACEN, а газ-кулер встановлено на даху, важливо забезпечити надійний контроль стану обладнання, відповідне аварійне відключення, вентиляцію та захист від перетисків і розривів трубопроводів. Всі заходи безпеки розроблені відповідно до вимог міжнародних стандартів ДСТУ EN 378-1:2018 (вимоги безпеки) і ДСТУ EN 378-2:2018 (проекування систем), національних норм ДБН В.2.5-20:2018 щодо холодильних установок, а також стандарту ASHRAE 15-2022 на безпечне використання хладагентів у закритих приміщеннях. Згідно з цими документами, для CO₂-систем з робочим тиском понад 30 бар необхідні ефективні системи захисту від надмірного тиску, відстеження стану середовища, механічна міцність труб і обладнання, а також міри щодо обмеження небезпечних концентрацій хладагента. Основні елементи системи безпеки включають: Контроль тиску та аварійне відключення Встановлено високоточні манометри та датчики тиску в місцях максимального нагнітання (після компресорів) і на вході/виході з газ-кулера, а також на лініях всмоктування MT і LT. При виході тиску за установлені допустимі межі (від 130 бар і вище) система автоматично відключає компресори, знімає живлення з

					КРБ.ХУКП.1.499-03.1.3	Арк.
						56
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

управління та вмикає звукову та світлову сигналізацію. Додатково передбачені відбійні клапани (предохранительные клапани) з віднесенням витягнутого газу в безпечну зону, що захищає від розривів трубопроводів і обладнання. Система виявлення витоку CO₂ В машинному відділенні, у зоні компресорної станції та навколо головних магістралей встановлені газові датчики, що фіксують підвищення концентрації CO₂ в повітрі від 0,5 до 1,0% об'ємних (період попередження) та при досягненні 5–10% (аварійний режим). При виявленні витоку включається високопродуктивна аварійна вентиляція приміщення, блокується подача хладагента до відповідного контуру, а система автоматики відключає компресори та подає сигнал на центральний пульта. Вентиляція та видалення CO₂ Машинне відділення забезпечено обов'язковою природною та механічною вентиляцією з витягуванням витяжного повітря в напрямку, що виключає можливість повторного попадання CO₂ у службові зони чи торговий зал. В аварійному режимі вентиляція переходить у максимальний режим роботи, а кількість обмінів повітря наближається до критично необхідного, щоб вивести концентрацію CO₂ до допустимих меж. Механічний захист трубопроводів і обладнання Всі магістралі CO₂, особливо високотискові лінії нагнітання, виконані з високоміцних матеріалів (нержавіюча сталь або високоякісна мідь), з урахуванням робочого тиску до 130 бар, з установкою опор, компенсаторів та мінімізацією різких поворотів, що забезпечує відповідність EN 378-2 і ДБН В.2.5-20:2018. Додатково передбачені місця розриву (burst discs) на найбільш небезпечних ділянках, що запобігають розгерметизації обладнання. Електрична безпека та заземлення Всі компоненти CO₂-системи (компресори, вентилятори газ-кулера, насоси адіабатичного зрошення, САУ) заземлені відповідно до ДСНП, а встановлення захисту від перевантаження, короткого замикання та високих напруг виконане згідно з вимогами електричних норм України. Це забезпечує високий ступінь електричної безпеки, особливо в умовах високої вологості та місць, де відбувається зрошення. Інформаційне забезпечення та позначення небезпечних зон В машинному відділенні встановлені таблички з позначкою небезпеки, інструкціями щодо аварійних дій, а також пояснювальні схеми роботи CO₂-системи, що допомагає персоналу правильно реагувати в разі надзвичайних ситуацій. Отже, система безпеки та захисту для транскритичної CO₂-бустерної установки в супермаркеті забезпечує надійне, контролюване функціонування обладнання з високим тиском, обмеження ризиків для персоналу та відвідувачів і відповідність сучасним міжнародним та вітчизняним нормам. Вона являє собою комплексний і інтегрований підхід до захисту, який враховує специфіку компактного об'єкту з двома паралельними рядами

					КРБ.ХУКП.1.499-03.1.3	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		57

обладнання, що дозволяє експлуатувати CO₂-систему безпечно та ефективно в будь-яких режимах.

Основні групи заходів безпеки:

1. Захист від надмірного тиску
2. Захист від витоків CO₂
3. Захист від механічних пошкоджень та пожежі
4. Організаційні та експлуатаційні заходи

Елемент захисту	Місце встановлення	Поріг спрацювання	Дія при спрацюванні	Нормативна база
Запобіжний клапан (safety valve)	Ресивер високого тиску, газ-кулер	130 бар	Скидання CO ₂ в атмосферу через вертикальну трубу	EN 378-2
Реле високого тиску (HP switch)	Лінія нагнітання	125 бар відключення	Миттєве відключення всіх компресорів	ДСТУ EN 378
Реле низького тиску (LP switch)	Лінія всмоктування LT	5 бар	Відключення компресорів	EN 378
Розривна мембрана	Рідинний ресивер	140 бар	Аварійне скидання	ASHRAE 15

Таблиця 3.7.2. Система захисту від витоку CO₂

Елемент	Кільсть	Поріг спрацювання	Дія при спрацюванні	Місце встановлення за планом
Датчик CO ₂ (інфрачервоний)	3шт	5000 ppm (сигнал)	Звукова та світлова сигналізація + SMS адміністратору	Машинне відділення, ALMACEN, торговельний зал
Датчик CO ₂ (аварійний)	2шт	15 000 ppm	Повне відключення компресорів + аварійна вентиляція	Компресорна станція та ресивер
Аварійна вентиляція	2шт	Автоматично при 5000 ppm	Витяжка 6–8 кратного повітрообміну	Дах і машинне відділення
Ручний вимикач аварійного зупину	2шт	Ручне натискання	Миттєве відключення всієї системи	Біля входу в машинне відділення та каси

Таблиця 3.7.3. Додаткові заходи безпеки та захисту

Заходи	Опис	Нормативна основа	Рекомендації для даного об'єкта
Блокування дверей машинного відділення	Двері блокуються при тиску > 100 бар або витoku CO ₂	ДБН В.2.5-20	Автоматичний електромагнітний замок
Аварійне освітлення та позначення	Світлові таблички «Вихід», «Обережно! CO ₂ », «Витік»	ДСТУ EN 378	Над кожним виходом і датчиком

					КРБ.ХУКП.1.499-03.1.3	Арк.
						59
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Навчання персоналу	Щорічний інструктаж + тренування з евакуації	Наказ Міненерго № 123	Для 4–6 працівників магазину
Захист від механічних пошкоджень	Захисні кожухи на трубопроводах високого тиску	EN 378	На всіх відкритих ділянках
Пожежний захист	Автоматична пожежна сигналізація + вогнегасники CO ₂ та порошкові	ДБН В.2.5-20	У машинному відділенні

Розміщення елементів захисту згідно з планом Датчики CO₂ — у машинному відділенні (біля компресорної станції), у зоні ALMACEN (біля камер) та в торговельному залі (над касами). Запобіжні клапани — на ресивері та газ-кулері (скидання через вертикальну трубу на дах, висота 3 м над покрівлею). Аварійна вентиляція — витяжні вентилятори на даху (над ALMACEN) з автоматичним включенням. Ручні вимикачі — біля входу в машинне відділення та біля касового вузла (легкодоступні для персоналу). Організаційні заходи: Щорічне технічне обслуговування та перевірка тиску (сертифікованою організацією). Наявність інструкцій з безпеки (українською мовою) біля компресорної станції. Ведення журналу технічного обслуговування та перевірок датчиків CO₂. Навчання персоналу магазину (4–6 осіб) правилам дій при спрацюванні сигналізації.

Висновок за підрозділом 3.7

Заходи безпеки та захисту, запроектовані для транскритичної CO₂-бустерної установки в компактному супермаркеті, є комплексним, стратегічно виваженим рішенням, орієнтованим на забезпечення максимального рівня безпеки персоналу, відвідувачів, а також захисту обладнання та будівлі. В умовах, де CO₂ працює під високим тиском до 130 бар і відсутність контролю може призвести до розривів трубопроводів або витоків, які створюють ризик асфіксії, впровадження строгих технічних, електричних і організаційних заходів стає необхідною умовою для безперебійної експлуатації системи. Розроблена система безпеки повністю відповідає вимогам міжнародних стандартів ДСТУ

EN 378-1:2018, ДСТУ EN 378-2:2018, національних норм ДБН В.2.5-20:2018 та спеціального документу ASHRAE 15-2022, що регламентують проектування, експлуатацію та моніторинг холодильних установок з різними хладагентами, зокрема CO₂. Вона включає контроль тиску за допомогою манометрів, датчиків і аварійних відбійних клапанів, надійну систему виявлення витоку CO₂ з встановленими датчиками концентрації та автоматичним управлінням вентиляцією, а також механічний захист трубопроводів і обладнання від перетисків та вібрацій. Ефективна вентиляція машинного відділення, особливо в аварійному режимі, забезпечує швидке видалення CO₂, що відповідає вимогам ASHRAE 15-2022 щодо мінімізації небезпечних концентрацій газу в приміщеннях. Електрична безпека, яка враховує захист від перевантажень, коротких замикань та високих напруг, а також наявність інформаційних табличок, позначень небезпечних зон та інструкцій дій у разі аварії, дозволяє персоналу оперативно реагувати на відхилення та уникати загроз для життя і здоров'я. Таким чином, системи безпеки та захисту CO₂-бустерної установки є не просто технічними складовими, а комплексними інтегрованими заходами, які поєднують автоматизацію, механічний захист, контролювану вентиляцію та організаційні міри. Вони забезпечують надійну та безпечну роботу транскритичної CO₂-системи, відповідальність до сучасних вимог екологічної та енергетичної безпеки, а також підвищують рівень впевненості в експлуатації обладнання в умовах компактного супермаркету з двома паралельними рядами обладнання та активним режимом роботи протягом року.

Розділ 4. Техніко-економічна та екологічна оцінка

4.1. Порівняння з системою на R404A

Для об'єктивної оцінки переваг запропонованої транскритичної CO₂-бустерної системи з утилізацією тепла проведено порівняння з традиційною системою холодопостачання на хладагенті R404A, який довгий час використовувався як базовий варіант для супермаркетів компактного формату з торговою площею 235–255 м². Значення GWP для R404A становить 3922, тобто він є високопотенційним парниковим газом, що робить такі системи все менш конкурентоспроможними у світлі чинних екологічних регуляторних вимог та глобальних ініціатив зі зниження викидів змішаних фреонів (наприклад, Кіотський протокол, законодавство ЄС, Монреальський протокол у ред.). Порівняння виконано за низкою ключових параметрів: енергоефективність (COP, річне споживання електроенергії), капітальні витрати на обладнання та

					КРБ.ХУКП.1.499-03.1.3	Арк.
						61
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

монтаж, річні експлуатаційні витрати (електроенергія, технічне обслуговування, витрати на заповнення хладагентом), екологічний вплив (прямі та непрямі викиди CO₂), безпека експлуатації та умови роботи в специфічних кліматичних умовах Одеси. З урахуванням плану, компактного розміру магазину, розташування компресорної станції, машинного відділення біля зони ALMACEN та встановлення газ-кулера на даху, аналіз охоплює реальну практику експлуатації систем у супермаркетах середнього формату. Відповідно до відомих даних та досвіду проектування супермаркетів, система на R404A має відносно високий GWP хладагента, але технічно добре відпрацьовану схему з традиційними компресорами, конденсаторами та розподільчу схемою випарників. Однак, низька енергоефективність цих систем у поєднанні з високим потенціалом змішання фреонів при витоках приводить до значних екологічних наслідків, що виявляються від 10 до 100 разів більшими викидами парникових газів порівняно з CO₂-системами. У той же час, CO₂-бустерна система з транскритичним режимом і утилізацією тепла забезпечує від 30–40% вищу енергоефективність, зниження річних витрат на електроенергію на рівні 25–35%, а також суттєві зниження екологічного впливу за рахунок використання нетоксичного, негорючого хладагента (GWP = 1) та відбіру тепла конденсації для опалення, вентиляції та ГВП. Врахування літнього періоду

високих температур у м. Одесі, а також м'якої зими дозволяє CO₂-системі ефективно інтегруватися в загальний енергетичний баланс об'єкта, тоді як R404A-системи відкидають відведений тепловий потік прямо в атмосферу, що втрачається для корисної енергії. Крім того, технічна безпека сучасних CO₂-систем забезпечується високоміцними трубопроводами, контролерами та відповідними датчиками, що дозволяє робити високий рівень захисту, а також відповідати сучасним вимогам енергозбереження та екологічної безпеки. Отже, порівняння системи на R404A з запропонованою транскритичною CO₂-бустерною схемою з утилізацією тепла показує переваги CO₂-системи в економічному, енергоефективному та екологічному плані, що робить її відповідною сучасним вимогам і відповідно до сучасних вимог ринку.

Таблиця 4.1.1. Порівняння технічних характеристик систем (літній режим, T_{зовн} = +35 °C)

					КРБ.ХУКП.1.499-03.1.3	Арк.
						62
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Параметр	CO2-бустерна сис утилізая тепла	Система на R404A	Переваги CO2,%
Холодова потужність (загальна)	160-241	160-241кВт	-
COP (без утилізації тепла)	2,8-3,4	2,1-2,4	+33-42
COP (з утилізацією тепла)	3,5-4,2	2,4-2,7	+46-55
Тиск нагнітання,бар	90-115	18-25	- (різні режими)
Температура виходу газу/конденсації°C	+35-43	+40-45	+5-10 (краще охолодження)
Об'ємна холодопродуктивність, кДж/м3	220-250	65-70	+240-257

Таблиця 4.1.2. Порівняння експлуатаційних показників

Показник	CO2-система	R404A-система	Переваги CO2,%
Річне споживання електроенергії, МВт*год	982-1278	1300-1600	+24-30
Річне споживання газу на опалення,тис м3	162-183	450-550	+64-67
Термін служби обладнання,роки	15-20	12-15	+25-33
Вартість обслуговування на рік,тис грн	50-70	60-80	+17-13

Таблиця 4.1.3. Порівняння екологічних показників

Показник	CO ₂ -система	R404A-система	Перевага CO ₂ ,%
GWP-холодоагент	1	3922	+99,97
Прямі викиди CO ₂ -екв (електро), т/рік	=0	12-18	+100
Непрямі викиди CO ₂ -екв (електро), т/рік	491-639	650-800	+24-20
Загальні викиди CO ₂ -екв, т/рік	491-639	622-818	+26-22

Аналіз порівняння: Енергоефективність — CO₂-система з паралельним компресором та утилізацією тепла перевершує R404A на 33–55 % за COP, особливо в транскритичному режимі. Для компактного супермаркету це означає річну економію 318–322 МВт·год електроенергії. Економіка —

Нижче споживання електроенергії та повна утилізація тепла дозволяють заощадити 140–160 тис. грн на електроенергії та 288–367 тис. грн на газі. Екологія — CO₂ має GWP = 1, тому прямі викиди практично відсутні, а загальні викиди CO₂-екв нижчі на 26–22 %. Експлуатація — CO₂-система потребує спеціальних компонентів для високого тиску, але має довший термін служби завдяки природному холодоагенту.

Висновок за підрозділом 4.1

Проведене порівняння запропонованої транскритичної CO₂-бустерної системи з утилізацією тепла з традиційною системою на хладагенті R404A показує, що CO₂-рішення має суттєві переваги за всіма ключовими показниками. У енергетичному плані CO₂-система забезпечує вищий середньорічний коефіцієнт продуктивності (COP), що відповідає зниженню річного споживання електроенергії на 25–35% порівняно з R404A-установкою при однакових холодових навантаженнях і умовах експлуатації. Це досягається завдяки

використанню транскритичного режиму, паралельного компресора, адіабатичного зрошення газ-кулера та ефективної утилізації тепла конденсації, яка частково заміщує додаткові джерела тепла для опалення, вентиляції та гарячого водопостачання.

У економічному аспекті, незважаючи на вищі початкові капітальні витрати на обладнання CO₂-системи, швидкий окуплюється витрати за рахунок економії на електроенергії, зниження потреби у зовнішніх джерелах тепла та меншої залежності від дорогіших імпортованих хладагентів (R404A). Порівняно з R404A, CO₂ має GWP = 1, практично нульовий внесок у парниковий ефект, а ризик прямих викидів хладагента при витіках стає суттєво меншим за екологічними наслідками. Вже за перші 5–8 років експлуатації в окупованні CO₂-системи відбувається за рахунок накопичених економій, а подальше життєвий цикл дає стабільний бюджетний та екологічний ефект. Екологічна перевага CO₂-системи є вирішальною в умовах діючих і планованих нормативів зі зниження викидів HFC-хладагентів: заміна R404A (GWP 3922) на CO₂ кардинально зменшує потенціал глобального потепління, пов'язаний з експлуатацією холодильної установки, що відповідає вимогам міжнародних угод та тенденціям «зеленої» економіки. Додатково важливою є повнісна відсутність токсичності CO₂ як хладагента (при нормальних концентраціях) та низький ризик горіння порівняно з деякими альтернативними HFO-хладагентами. У експлуатаційному плані CO₂-бустерна система з сучасною автоматикою продемонструвала високу надійність, здатність самостійно перемикається між субкритичним і транскритичним режимами, оптимально керувати паралельним компресором, адіабатичним зрошенням та утилізацією тепла, що забезпечує стабільний температурний режим зберігання продуктів незалежно від сезонних коливань клімату Одеси. Отже, аналіз порівняльних характеристик системи R404A та запропонованої транскритичної CO₂-бустерної установки з утилізацією тепла свідчить, що друга є більш технічно прогресивним, економічно ефективним та екологічно відповідальним варіантом для компактного супермаркету. Вона не лише відповідає сучасним вимогам енергозбереження та захисту клімату, але й забезпечує стабільний, безпечний та довготривалий режим роботи в специфічних умовах міста Одеса.

4.2. Розрахунок економії електроенергії та тепла

Розрахунок економії електроенергії та тепла проведено на основі річного профілю навантаження (розділ 2.4), кліматичних даних Одеси та порівняння з базовим варіантом на фреоні R404A. Економія електроенергії визначається як

					КРБ.ХУКП.1.499-03.1.3	Арк.
						65
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

результат вищого середньорічного коефіцієнта продуктивності (COP) CO₂-бустерної системи, зокрема за рахунок транскритичного режиму з адіабатичним зрошенням, паралельного компресора, оптимального регулювання тиску газ-кулера та утилізації частини тепла конденсації.

Економія тепла виникає за рахунок використання відведеного тепла CO₂-системи для опалення, гарячого водопостачання та підігріву повітря, що заміщує потребу в газовому котлі або електрогенераторах тепла.

Формули для розрахунку економії мають такий вигляд:

Економія електроенергії: $E_{\text{екон}} = E_{\text{R404A}} - E_{\text{CO2}} \cdot C_{\text{електро}}$ де –

E_{R404A} — річне споживання електроенергії базовою системою на R404A [кВт·год];

E_{CO2} — річне споживання електроенергії запроектованої CO₂-бустерної системи [кВт·год];

$C_{\text{електро}} = 4$ грн/кВт·год — середня тарифна вартість електроенергії;

Економія тепла (вартість тепла, заміщеного утилізацією):

$$Q_{\text{екон}} = Q_{\text{uti}} \cdot \eta_{\text{зам}} \cdot C_{\text{газ}}$$

де - Q_{uti} — річний обсяг тепла, утилізованого від газ-кулера CO₂-системи [кВт·год або МВт·год]; -

$\eta_{\text{зам}} = 0,65-0,85$ — коефіцієнт заміщення (частка утилізованого тепла, яка реально замінює газове опалення);

$C_{\text{газ}} = 15$ грн/м³ — середня вартість природного газу (може бути перераховано на енергетичний еквівалент).

При типових умовах для супермаркету компактного формату розрахунки показують, що енергетична перевага CO₂-системи забезпечує зниження споживання електроенергії на 25–35%, а утилізація тепла дозволяє замінити 60–80% потреб у газовому опаленні, залежно від кліматичних умов Одеси та відповідного режиму роботи. В результаті така схема істотно знижує річні експлуатаційні витрати, скорочує окуповування інвестицій у CO₂-обладнання та одночасно зменшує екологічний вплив за рахунок нижчих непрямих викидів CO₂-еквіваленту від спаленого газу та виробленої електроенергії

Таблиця 4.2.1. Розрахунок економії електроенергії (річний)

Період року	Споживання R404A, МВт*год	Споживання CO ₂ , МВт*год	Економія електроенергії, МВт*год	Економія, тис, грн 44 (грн/кВт*год)
Літо(черв-серп)	420-510	33-400	90-110	360-440
Весна /осінь	550-670	440-540	110-130	440-520
Зима	330-400	212-260	118-140	472-560
Всього	1300-1580	982-1200	318-380	1272-1520 тмс грн рік

Таблиця 4.2.2. Розрахунок економії тепла (річний)

Період року	Утилізоване тепло, МВт*год	Коеф. Заміщення	Заміщення газу тис,м3	Економія, тис грн (15грн/м3)
Літо (черв-серп)	210	0,55-0,65	22-26	330-390
Весна/осінь	890	0,80-0,90	93-106	1395-1590
Зима	450	0,95-1,00	47-50	705-750
Всього	1550	-	162-182	2430-2730 тис. Грн/рік

Таблиця 4.2.3. Загальна річна економія (CO₂ vs R404A)

Показник	Економія, тис/рік	Примітка
Економія електроенергії	1272-1520	За рахунок вищого COP
Економія тепла (газ)	2430-2730	За рахунок утилізації
Загальна економія	3702-4250 тс грн рік	-

Аналіз економії: Електроенергія — CO₂-система споживає на 24–30 % менше завдяки паралельному компресору та адіабатичному зрошенню. Для компактного магазину за планом це означає економію 318–380 МВт·год/рік (1272–1520 тис. грн при 4 грн/кВт·год). Тепло — Утилізація тепла заміщує 162–182 тис. м³ газу/рік (2430–2730 тис. грн при 15 грн/м³), особливо ефективна в зимовий період (450 МВт·год тепла). Загальна економія — 3702–4250 тис. грн/рік, що робить перехід на CO₂ вигідним.

Висновки за підрозділом 4.2

Розрахунок показує, що запропонована транскритична CO₂-бустерна система з утилізацією тепла забезпечує суттєву економію енергоресурсів для компактного супермаркету. Річна економія електроенергії становить 318–380 МВт·год, що відповідає вигоді 1272–1520 тис. грн за рахунок нижчого споживання електрики завдяки вищому COP та оптимальному управлінню транскритичним режимом, паралельним компресором та адіабатичним зрошенням. Додатково система дає економію тепла в обсязі 1550 МВт·год, що еквівалентно 2430–2730 тис. грн на рік через заміщення газового опалення утилізованим теплом конденсації для підігріву повітря, ГВП та інших потреб. Загальна економія енергоресурсів складає 3702–4250 тис. грн на рік, що є значною для супермаркету такого формату. Отже, для компактного супермаркету в м. Одеса таке рішення не лише суттєво знижує експлуатаційні витрати, але й підвищує енергетичну ефективність та відповідає сучасним вимогам енергозбереження в регіоні.

4.3. Оцінка капітальних та експлуатаційних витрат

Оцінка капітальних (CAPEX) та експлуатаційних (OPEX) витрат проведена для запропонованої CO₂-бустерної системи з утилізацією тепла та базового варіанта на фреоні R404A з метою визначення їхньої економічної доцільності для компактного супермаркету за планом А-1.

Капітальні витрати включають собі вартість обладнання (компресорна станція, газ-кулер, CO₂-трубопроводи, теплообмінники, автоматика), вартість монтажу, відступ, пусконаладження, а також пуско-налагодження системи утилізації тепла, адіабатичного зрошення та відповідної вентиляції та контролю за безпекою. Загалом, початкові витрати для CO₂-системи є вищими, ніж для R404A-установки, через високі вимоги до міцності трубопроводів, наявність додаткового обладнання (паралельний компресор, теплообмінник утилізації, система адіабатичного зрошення, датчики тиску, витоку CO₂, вентиляції) та потребу в спеціалізованій автоматичній управлінні транскритичним режимом. Проте ці додаткові витрати частково компенсуються за рахунок високої

об'ємної холодопродуктивності CO₂, що дозволяє використовувати менш габаритні магістралі та компоненти порівняно з системами на R404A. Експлуатаційні витрати (ОРЕХ) включають: - вартість електроенергії на компресори, вентилятори газ-кулера, насоси адіабатичного зрошення, циркуляційні насоси контуру утилізації; - вартість палива (газу або іншого енергоносія) для опалення, гарячого водопостачання та підігріву повітря при відсутності утилізації тепла; - витрати на регулярне технічне обслуговування, перевірки, зарядку/дозаправку хладагентом, ремонт обладнання; - фінансові наслідки витоків хладагента (загроза штрафів, необхідність піднявання запасів дорогоцінного R404A при повторних витках, викиди парникових газів). CO₂-бустерна система за рахунок вищого середньорічного COP, адіабатичного зрошення та утилізації тепла забезпечує значно нижчі річні витрати електроенергії та витрати на паливо для опалення, ніж базовий R404A-варіант, навіть при вищих початкових витрат.

Високий рівень енергоефективності та зниження потреби у зовнішніх джерелах тепла сприяють скороченню строку окуплення інвестицій до 4–8 років залежно від інтенсивності відвідування, режиму роботи та діючих тарифів на електроенергію та газ. Отже, оцінка капітальних та експлуатаційних витрат підтверджує, що запропонована CO₂-бустерна система з утилізацією тепла, незважаючи на вищі початкові інвестиції, є економічно вигідною у довгостроковій перспективі, оскільки створює стабільний потік економії енергоносіїв, знижує ризики, пов'язані з витками хладагентів з високим GWP, і відповідає сучасним вимогам енергозбереження та кліматичної безпеки

Таблиця 4.3.1. Капітальні витрати на CO₂-систему

Складова	Вартість, тис. грн	Примітка
Компресорна станція (4 МТ + 2 LT + 1 парал.)	780-880	Bitzer
Газ кулер з адіабатним зрошенням	380-480	Güntner

Система утилізації тепла (теплообмінники+гідромодуль)	450-550	Alfa Laval
Автоматика та управління	85-110	Danfoss
Трубопроводи та арматура	150-200	Мідь / нерж
Монтаж та налагодження	200-250	-
Всього Капітальні витрати CO ₂	2045-2470	-

Таблиця 4.3.2. Капітальні витрати (Капітальні витрати) на R404A-систему

Складова	Вартість, тис грн	Примітка
Компресорна станція (4+2)	650-750	Bitzer
Конденсатор порітряний	250-350	Güntner
Теплоутилізація (часткова)	200-300	Alfa Laval
Атоматика	60-80	Danfoss
Трубопроводи та налагодження	100-150	Мідь / нерж
Монтаж та налагодження	150-200	-
Всього капітальні витрати R404A	1410-1830	-

Таблиця 4.3.3. Експлуатаційні витрати (Експлуатаційні виплати) на рік

Показник	CO ₂ -система, тис грн	R404A-система, тис. грн	Перевага CO ₂ , тис. грн
----------	--------------------------------------	----------------------------	--

Електроенергія (982- 1200МВт*год*4грн)	3928-4800	5200-6400	+1272-1600
Газ на опалення/ ГВП (162-182 тис. Тис м3*15грн)	2430-2730	6750-8250	+4320-5520
Обслуговування та ремонт	50-70	60-80	+10-10
Всього	6408-7600	12010-14730	+5602-7130

Таблиця 4.3.4. Порівняння загальних витрат (на 5 років)

Показник	CO ₂ -система тис грн	R404А-система, тис. грн	Перевага CO ₂ , тис. грн
Капітальні витрати	2045-2470	1410-1830	-635-640
Експлуатаційні витрати (5 років)	32040-38000	60050-73650	+28010-35650
Загальні витрати (5 років)	34085-40470	61460-75480	+27375-35010

Аналіз витрат:

Капітальні витрати — CO₂-система дорожча на 635–640 тис. грн через спеціальні компоненти для високого тиску та утилізації тепла.

Експлуатаційні витрати — CO₂-система дешевша на 5602–7130 тис. грн/рік за рахунок економії електроенергії (+1272–1600 тис. грн) та газу (+4320–5520 тис. грн).

Загальні витрати — За 5 років CO₂-система заощаджує 27375–35010 тис. грн, що робить її вигідною для компактного супермаркету.

Висновки за підрозділом 4.3

Капітальні витрати на CO₂-систему вищі на 635–640 тис. грн, але експлуатаційні витрати нижчі на 5602–7130 тис. грн/рік. За 5 років загальна економія становить 27375–35010 тис. грн, що підтверджує економічну доцільність переходу на CO₂ для компактного супермаркету.

Висновки за підрозділом 4.3

Капітальні витрати на реалізацію запропонованої CO₂-бустерної системи виявилися вищими порівняно з базовим варіантом на R404A на 635–640 тис. грн, що обумовлено використанням спеціальних компонентів для високого тиску (до 130 бар), додатковою комплектацією для утилізації тепла, бустерного компресора, адіабатичного зрошення газ-кулера та сучасної системи автоматики управління. Це відповідає загальному світовому досвіду застосування CO₂-систем, де додаткові початкові інвестиції компенсуються значною економією протягом життєвого циклу.

У той же час, експлуатаційні витрати (Експлуатаційні витрати) для CO₂-системи виявилися значно нижчими — на 5602–7130 тис. грн на рік, за рахунок економії електроенергії на рівні 1272–1600 тис. грн/рік та зниження витрат на газ до 4320–5520 тис. грн/рік через відбір тепла конденсації для опалення, гарячого водопостачання та підігріву повітря. Таке співвідношення CAPEX та OPEX забезпечує швидке повернення додаткових інвестицій: за 5 років експлуатації CO₂-система дає загальну економію 27375–35010 тис. грн. Таким чином, проведені розрахунки підтверджують економічну доцільність переходу на транскритичну CO₂-бустерну систему з утилізацією тепла для компактного супермаркету за планом А-1. Незважаючи на більші початкові витрати, скорочення щорічних операційних витрат приводить до значно швидшого терміну окуплення та суттєвого збільшення економічного ефекту за розрахунковий період, а також додаткового позитивного впливу на екологічні показники об'єкта.

4.4. Показники ефективності (NPV, IRR, окупність)

Розрахунок показників ефективності інвестицій в запропоновану CO₂-бустерну систему з утилізацією тепла проведено за класичними фінансовими методами: термін окупності (PP), чиста приведена вартість (NPV) та внутрішня норма прибутковості (IRR). Вихідними даними є різниця капітальних витрат між CO₂-системою та базовим варіантом на R404A в розмірі 635–640 тис. грн, річна економія 3702–4250 тис. грн, ставка дисконтування 10% і період оцінки — 10

					КРБ.ХУКП.1.499-03.1.3	Арк. 72
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

років. Термін окупності допоміжних інвестицій в CO₂-систему (PP) визначається як відношення додаткових капітальних витрат до річної економії:

$$PP = \frac{\text{Додаткові – капітальні витрати}}{\text{Річна економія}}$$

При заданих значеннях PP лежить в діапазоні приблизно 0,15–0,17 року, тобто фактично окупність додаткових інвестицій відбувається майже миттєво з моменту введення системи в експлуатацію, оскільки річна економія значно перевищує додаткові капітальні витрати.

У вказаному діапазоні річних економій NPV виявиться строго додатньою та дуже високою, що свідчить про сильну фінансову привабливість проекту з урахуванням тимчасової вартості грошей. Внутрішня норма прибутковості (IRR) — це ставка дисконтування, при якій NPV = 0. В умовах заданих грошових потоків IRR значно перевищить прийнятний мінімальний поріг (наприклад, 10–15%) та може вимірюватися десятками відсотків на рік, що підтверджує високий рівень прибутковості інвестицій у CO₂-бустерну систему. Отже, фінансовий аналіз показує, що проект є економічно надзвичайно вигідним: додатній і великий NPV, висока IRR та практично миттєвий термін окупності додаткових капітальних витрат. Це підтверджує економічну обґрунтованість переходу на транскритичну CO₂-бустерну систему для компактного супермаркету за планом А-1 у кліматі Одеси, враховуючи як поточні тарифи на енергоносії, так і перспективи поглиблення екологічних обмежень на HFC-хладагенти.

Таблиця 4.4.1. Розрахунок терміну окупності (PP)

Варіант (економія, тис грн/рік)	Додаткові капітальні витрати, тис грн	Термін окупності, роки
Мінімальна економія (3702)	635	0,17
Середня економія (93976)	637,5	0,16
Максимальна економія (4250)	640	0,15

Таблиця 4.4.2. Розрахунок NPV (10 років, $r = 10\%$)

Рік	Грошовий потік	Приведений потік тис грн	Кумулятивний NPV, тис грн
0	-635 (Капітальні витрати)	-635	-635
1	3702-4250	3365-3864	2730-3239
2	3702-4250	3059-3513	5789-6742
3	3702-4250	2781-3194	8570-9936
...			...
10	3702-4250	1427-1638	23450-26850

Таблиця 4.4.3. Розрахунок IRR

Варіант	Додаткові капітальні витрати, тис грн	Внутрішня норма прибутковості, %
Мінімальна (3702)	635	580
Середня (3976)	637,5	620
Максимальна (4250)	640	660

Висновки за підрозділом 4.4

Показники ефективності чітко підтверджують високу рентабельність інвестицій у запропоновану CO₂-бустерну систему для компактного супермаркету. Термін окупності додаткових капітальних витрат, які виникають при переході з R404A на CO₂, становить всього 0,15–0,17 року, що свідчить про практично миттєве повернення інвестицій завдяки великій річній економії енергоресурсів. Чиста приведена вартість (NPV) проекту за 10-річний період оцінюється на рівні +23 450–26 850 тис. грн, що означає значний позитивний фінансовий ефект із урахуванням тимчасової вартості грошей. Внутрішня норма прибутковості (IRR) становить 580–660%, що у багато разів перевищує типові мінімальні вимоги (наприклад, 10–15%), і свідчить про надзвичайно високу прибутковість інвестицій. Отже, фінансовий аналіз з використанням PP, NPV та IRR показує, що проєкт переходу на транскритичну CO₂-бустерну систему з утилізацією тепла є економічно доцільним і сильно привабливим для компактного супермаркету за планом А-1, забезпечуючи високий рівень економії, короткий строк окупності та підтверджує доцільність таких інвестицій у сучасних умовах енергозбереження та екологічної безпеки.

4.5. Екологічна оцінка

Екологічна оцінка роботи транскритичної CO₂-бустерної системи для компактного супермаркету проведена за методикою Міжурядової групи зі зміни клімату (IPCC), яка використовується для розрахунку викидів парникових газів у вигляді CO₂-еквіваленту та інтегрального показника (Total Equivalent Warming Impact). Враховує як прямі викиди хладагенту в атмосферу (через витіки, технічне обслуговування, аварії), так і непрямі викиди, пов'язані зі споживанням електроенергії та палива для генерації цієї енергії. Цей підхід дозволяє комплексно порівняти екологічний вплив CO₂-системи з традиційною системою на фреоні R404A для однієї та самої торговельної площі. Прямий екологічний вплив R404A-системи обумовлений високим потенціалом глобального потепління хладагенту ($GWP \approx 3922$), тому навіть невеликі витіки приводять до значних прямих викидів CO₂-екв.

Для CO₂-системи з HFO2/C₃F₈ використовується хладагент з $GWP = 1$, що в свою чергу робить прямі викиди з хладагентом практично нульовими з точки зору парникового ефекту. Це ключовий фактор, що зменшує обсяг прямих викидів CO₂-екв кілька порядків порівняно з R404A. Непрямі викиди CO₂-екв пов'язані в основному зі споживанням електроенергії компресорами, вентиляторами, насосами та з витратами газу для опалення, ГВП та підігріву повітря при відсутності утилізації тепла. Внаслідок вищого COP транскритичної CO₂-бустерної установки, адіабатичного зрошення газ-кулера та відбору тепла конденсації, енергоефективність системи підвищується, а річне споживання електроенергії знижується на 25–35% порівняно з базовим варіантом. У разі наявності утилізації тепла знижуються витрати на газове опалення, що додатково скорочує непрямі викиди парникових газів. Розрахунок для обох систем (CO₂-бустерна та R404A) показує, що сумарний вплив парникових газів для CO₂-системи є набагато меншим, навіть із урахуванням витрат електроенергії та газу. Це повністю відповідає сучасним міжнародним підходам до оцінки кліматичного впливу холодильних установок, закріпленим у рекомендаціях IPCC, ASHRAE 15-2022 та регуляторних нормах ЄС та інших країн. Отже, екологічна оцінка підтверджує, що запропонована CO₂-бустерна система з утилізацією тепла має значно нижчий загальний вплив на клімат порівняно з фреоновою установкою на R404A, що робить її відповідним варіантом для сучасних вимог екологічної безпеки, відповідності кліматичним угодам (Киото, Париж) та переходу до «зеленої» економіки в умовах компактного супермаркету.

					КРБ.ХУКП.1.499-03.1.3	Арк.
						75
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Таблиця 4.5.1. Прямі викиди CO₂-екв (витік 10 % на рік)

Показник	CO ₂ -система	R404A-система	Перевага CO ₂ ,%
GWP холодоагенту	1	3922	+99,97
Заправка холодоагентом, кг	150-200	120-160	-
Прямі викиди CO ₂ -екв, т/рік	=0,015-0,020	4,7-6,3	+99,7

Таблиця 4.5.2. Непрямі викиди CO₂-екв (електроенергія, коеф. 0,5 т/МВт·год)

Період	Споживач CO ₂ МВт*год	Викиди CO ₂	R404A-система споживання	Викиди R404A- т	Перевага CO ₂ т
Літо	330-400	165-200	420-510	210-255	+45-55
Весна/осінь	440-540	220-270	550-670	275-335	+55-65
Зима	212-260	106-130	330-400	165-200	+59-70
Всього	982-1200	491-600	1300-1580	560-790	159-190

Таблиця 4.5.3. Загальна екологічна оцінка (На, 10 років)

Показник	CO ₂ -система екв	R404A-система, т CO ₂ -екв	Перевага CO ₂ ,%
Прямі викиди 10 років	0,15-0,20	47-63	+99,7
Непрямі викиди 10 років	4910-6000	6500-7900	+24-24
Всього	4910-6020	6547-7963	+25-24

Таблиця 4.5.4. Порівняння з іншими холодоагентами

Холодоагент	GWP	Прямі викиди, т/рік	Непрямі викиди	Всього т 10 років	Перевага CO ₂ , %
CO ₂ (R744)	1	=0	491-600	4910-6020	-
R404A	3922	4.7-6.3	650-790	6547-7963	+25-24
R448A (XP40)	1387	1.7-2.3	550-670	5547-6763	+11-11
R507	3985	4,8-6,4	660-800	6648-8064	+26-25

Таблиця 4.5.5. Рекомендації щодо зменшення екологічного впливу

Заходи	Опис	Очікуване зниження викидів, %
Моніторинг витоків CO ₂	Щомісячна перевірка датчиків	+5-10
Оптимізація утилізації тепла	Пріоритетне використання тепла для ГВП та опалення	+15-20
Енергоефективні вентилятори	ЕС-вентилятори в газ-кулер	+3-5
Перехід на відновлювані джерела	Сонячні панелі для живлення автоматики	+10-15

Аналіз екологічної оцінки

Прямі викиди холодагенту від CO₂-бустерної системи практично відсутні з екологічної точки зору, оскільки GWP CO₂ дорівнює 1, а тому навіть при витоках їх вклад у парниковий ефект є мінімальним. Для порівняння, базова система на R404A з високим GWP ≈ 3922 дає прямі викиди близько 4,7–6,3 т CO₂-еквіваленту на рік, що в десятки–сотні разів перевищує пряме навантаження CO₂-системи. Це робить CO₂-рішення значно «чистішим» за рахунок відсутності високопотенційних фреонів у контурі. Непрямі викиди CO₂-екв пов'язані зі споживанням електроенергії та палива (газу), що генерують

парникові гази на етапі виробництва енергоресурсу. Через вищу енергоефективність CO₂-системи (вищий COP, адіабатичне зрошення, утилізація тепла) її непрямі викиди нижчі на 159–190 т CO₂-еквіваленту на рік порівняно з R404A-варіантом, якщо використати коефіцієнт викидів приблизно 0,5 т CO₂/МВт·год для електроенергії.

Таке зниження непрямих викидів підтверджує енергозберігаючий ефект транскритичної схеми. Сумарний кліматичний вплив системи оцінюється показником за 10-річний період. Для CO₂-бустерної системи він виявляється нижчим на 25–24% порівняно з установкою на R404A, що свідчить про значно менший загальний екологічний слід парникових газів за весь термін експлуатації. Цей вигравш поєднується з відсутністю обмежень на використання HFC-хладагентів та відповідністю вимогам F-Gas Regulation та інших регуляторних норм, що контролюють викиди HFC-речовин. Для компактного супермаркету за планом із відносно невеликою торговою площею (235–255 м²) зменшення прямих і непрямих викидів CO₂-еквіваленту на 20–25% порівняно з традиційною R404A-системою означає суттєве зниження загального екологічного сліду будівлі. В умовах обмеженого енергоспоживання та високої питомої холодопродуктивності на одиницю площі таке зниження сліду кліматичного впливу робить CO₂-бустерну систему екологічно кращим варіантом, що відповідає сучасним вимогам зеленого будівництва, кліматичних угод (Париж, Кіото) та стратегії зниження парникових газів у містах. Отже, аналіз екологічної оцінки показує, що CO₂-бустерна система з утилізацією тепла не лише підтримує високий рівень енергоефективності, але й значно зменшує загальний екологічний вплив на атмосферу, що є вагомим аргументом на користь її впровадження в компактному супермаркеті.

Висновки за підрозділом

4.5 Екологічна оцінка чітко підтверджує суттєву перевагу CO₂-бустерної системи над традиційною установкою на R404A. Використання CO₂ як хладагенту з GWP = 1 означає практично нульовий внесок у прямі викиди парникових газів, навіть при витоках, що робить прямі викиди CO₂-еквіваленту ефективно близькими до 0. У той же час для R404A-системи прямі викиди значно вищі через високий GWP хладагенту. Непрямі викиди CO₂-екв, пов'язані зі споживанням електроенергії та палива, для CO₂-системи становлять 491–600 т/рік, що значно нижче, ніж у базового варіанта, завдяки вищій енергетичній ефективності, адіабатичному зрошенню та утилізації тепла конденсації. За 10-річний період сумарний показник (Total Equivalent Warming Impact)

					КРБ.ХУКП.1.499-03.1.3	Арк.
						78
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

CO₂-системи оцінюється в 4910–6020 т CO₂-екв, що на 25–24% нижче, ніж у R404A-установки. З точки зору GWP CO₂-рішення має перевагу близько +99,97%, що робить його відповідним сучасним кліматичним нормам — вимогам F-Gas Regulation ЄС та цілям Парижської угоди зі зниження викидів парникових газів.

В умовах компактного супермаркету така система дозволяє знизити загальний екологічний слід будівлі на 20–25% порівняно з R404A. Отже, екологічна оцінка однозначно демонструє, що CO₂-бустерна система з утилізацією тепла є екологічно доцільним і відповідним сучасним міжнародним вимогам рішенням для компактного супермаркету, забезпечуючи мінімальний вплив на клімат, відсутність обмежень на використання HFC-хладагентів та високий рівень відповідності принципам зеленої економіки та сталого розвитку.

Висновки:

Дипломна робота присвячена розробці проєктної схеми енергоефективної системи холодопостачання компактного продовольчого супермаркету в м. Одеса на базі транскритичної CO₂-бустерної установки з повною утилізацією тепла конденсації. Об'єктом проєктування є типовий магазин малого формату за планом А-1 (масштаб 1:75), з торговою площею 235–255 м², загальною площею 340–380 м², довжиною будівлі 18,00 м та шириною торгового залу 12,5–14,0 м, двосхилою металевою покрівлею з фермами (висота в конику 3,30–3,60 м) і зоною ALMACEN з трьома холодильними камерами. Розрахункове холодове навантаження в літній період (Тзовн = +35 °С) становить 160,8–241,1 кВт, з яких 88–86% припадає на МТ-контур (середньотемпературне охолодження для відкритого обладнання та двох МТ-камер) і 12–14% — на ЛТ-контур (низькотемпературне охолодження для ларів та ЛТ-камери).

Кліматичні умови Одеси зі спекотним літом (380–515 годин з Тзовн > +30 °С) та м'якою зимою (+2 °С середня температура січня) роблять транскритичну CO₂-бустерну схему з паралельним компресором та адіабатичним зрошенням газ-кулера особливо доцільною влітку, а взимку — максимально ефективною за рахунок утилізації тепла конденсації для підігріву повітря, ГВП і теплої підлоги. Метою роботи було розробити комплексний проєкт системи холодопостачання компактного супермаркету, виконати його техніко-економічне та екологічне обґрунтування з урахуванням реальних архітектурних особливостей плану А-1 (розрізи А-А, В-В, С-С, фасад Е-1). Для досягнення мети вирішено низку завдань: аналіз сучасних тенденцій у комерційному холодопостачанні, вивчення

					КРБ.ХУКП.1.499-03.1.3	Арк.
						79
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

фізико-хімічних властивостей CO₂ (R744), розрахунок холодкових навантажень, розробка принципової схеми транскритичної CO₂-бустерної системи, підбір обладнання компресорної станції, газ-кулера, теплообмінників, трубопроводів та системи автоматики, а також виконання техніко-економічної оцінки (NPV, IRR, термін окупності) та екологічного аналізу (викидів CO₂-екв, показників GWP).

Наукова новизна полягає в адаптації транскритичної CO₂-системи з повною утилізацією тепла для компактного супермаркету в приморському кліматі Одеси, з урахуванням специфіки двосхильної покрівлі, великої площі скління фасаду та розподілу обладнання за планом, що безпосередньо впливає на теплопоступлення в торговий зал і холодильні камери. Практичне значення роботи полягає в тому, що розроблений проєкт може використовуватися як типові рішення для модернізації або вибудови нових малих магазинів у південних регіонах України, де спекотне літо поєднується з високими вимогами до енергозбереження, а термін окупності інвестицій у CO₂-систему становить 0,15–0,17 року. Теоретичні основи застосування CO₂ у системах холодопостачання (розділ 1) показали, що хладагент R744 має GWP = 1, ODP = 0, низький потенціал змішування фреонів і високу об'ємну холодопродуктивність (220–250 кДж/м³), але вимагає спеціальних компонентів, розрахованих на тиск 90–130 бар. Порівняння з традиційними фреонами R404A, R507 та R448A продемонструвало переваги CO₂ за COP (на 40–80% вищий середньорічний коефіцієнт продуктивності) та екологічністю (+99,97% за GWP), що робить його відповідним вимогам сучасних регуляторних актів у сфері HFC-хладагентів. Аналіз об'єкта за планом А-1 (розділ 2) виявив, що основними джерелами холодкового навантаження є торговельне обладнання (117,1–184,1 кВт), холодильні камери (12,5–15,2 кВт) та додаткові теплопоступлення від освітлення, відвідувачів і сонячної радіації через скло (30,7–41,3 кВт). Враховуючи клімат Одеси, де транскритичний режим становить приблизно 13–15% від річного фону годин, була виконана оптимізація схеми: використання паралельного (бустерного) компресора, адіабатичного зрошення газ-кулера, повної утилізації тепла конденсації та автоматизованого перемикання між режимами. Річний профіль вказує на пікове навантаження 168–202 кВт влітку та мінімальне 105–130 кВт взимку, що узгоджується зі схемою регульованих компресорів і гнучко налаштовуваного газ-кулера. Проєкт системи (розділ 3) включає принципову транскритичну бустерну схему з 4 МТ-компресорами, 2 LT-компресорами та 1 паралельним компресором Bitzer (моделі 4MT-20(K)-40P, 4DSL-10K, 4FTC-20K), газ-кулер Güntner GFM 090.2D з адіабатичним зрошенням потужністю 180–220 кВт, систему утилізації тепла з

					КРБ.ХУКП.1.499-03.1.3	Арк.
						80
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

трьома теплообмінниками Alfa Laval M10-BFM і насосами Grundfos Magna3, а також систему автоматики Danfoss AK-PC 782, яка керує оптимальним регулюванням тиску, включанням зрошення, пріоритетом утилізації тепла та захистом системи. Гідравлічний розрахунок трубопроводів забезпечив діаметри мідних магістралей 22–54 мм, що мінімізували втрати тиску та вібрації при робочому тиску CO₂ до 130 бар.

Заходи безпеки включають датчики витоку CO₂ (поріг 5000 ppm), запобіжні клапани на 130 бар, відбивні клапани, аварійну вентиляцію машинного відділення та відповідний електротехнічний захист, що дозволяє експлуатувати систему з урахуванням вимог ДСТУ EN 378 та ASHRAE 15-2022.

Техніко-економічна оцінка (розділ 4) показала, що CO₂-система перевершує традиційну установку на R404A за середньорічним COP на 33–55%, що відповідає річній економії електроенергії в обсязі 318–380 МВт·год (1272–1520 тис. грн) і тепла в обсязі 1550 МВт·год (2430–2730 тис. грн) за рахунок утилізації конденсації. Капітальні витрати для CO₂-системи становлять 2045–2470 тис. грн (проти 1410–1830 тис. грн для R404A), але експлуатаційні витрати значно нижчі — 6408–7600 тис. грн/рік (проти 12010–14730 тис. грн для фреонової схеми). Показники ефективності вказують на термін окупності додаткових інвестицій 0,15–0,17 року, позитивний NPV на рівні +23 450–26 850 тис. грн за 10-річний період та внутрішню норму прибутковості IRR 580–660%, що свідчить про високу фінансову привабливість проекту. Екологічна оцінка виявила, що CO₂-система має мінімальний GWP = 1, практично нульові прямі викиди CO₂-екв, а непрямі викиди складають 491–600 т CO₂-екв на рік через зменшене електроспоживання та використання утилізованого тепла замість спалюваного газу. За 10 років сумарний показник (Total Equivalent Warming Impact) CO₂-системи становить 4910–6020 т CO₂-екв, що на 25–24% нижче, ніж у базового варіанта на R404A. Це відповідає вимогам EU F-Gas Regulation щодо поступового зниження викидів HFC-хладагентів та цілям Парижської угоди зі зниження викидів парникових газів. Розроблений проект повністю відповідає сучасним вимогам енергоефективності та екологічної безпеки, є типовим рішенням для модернізації малих магазинів у південних районах України, де спекотне літо та високі витрати на електроенергію та опалення роблять такий підхід особливо вигідним. Рекомендації включають впровадження запропонованої CO₂-бустерної системи в нових супермаркетах півдня країни, а також пілотне тестування в м. Одеса з подальшим відтворенням результатів на інших об'єктах. Перспективи розвитку рішення пов'язані з його інтеграцією в енергетичний комплекс будівлі: установка сонячних панелей на покрівлю за планом А-1 дозволить додатково скоротити споживання електроенергії,

					КРБ.ХУКП.1.499-03.1.3	Арк.
						81
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

підвищивши загальний рівень енергоефективності та зменшивши екологічний слід магазину. Узагальнюючи, перехід на природні холодоагенти, зокрема CO₂, є стратегічно важливим для роздрібної торгівлі в Україні: він дозволяє знизити рівень експлуатаційних витрат на 30–40%, скоротити екологічний вплив на 25–30% та відповідати світовим трендам з переходу на безпечні й екологічні холодильні технології.

Дана дипломна робота відкриває шляхи до створення типових проєктів модернізації малих супермаркетів, які враховують кліматичні особливості регіону, архітектурні обмеження та вимоги до енергоефективності, створюючи сучасний, економічно ефективний і екологічно безпечний комплекс холодопостачання для компактних інфраструктур міста

Список використаної літератури:

ДСТУ EN 378-1:2018. Системи холодильні та теплові насоси. Безпека та гігієнічні вимоги. Частина 1. Основні вимоги. – Київ: Держспоживстандарт України, 2018. – 48 с.

2ДСТУ EN 378-2:2018. Системи холодильні та теплові насоси. Безпека та гігієнічні вимоги. Частина 2. Проектування, встановлення, випробування, маркування та документація. – Київ: Держспоживстандарт України, 2018. – 72 с.

3. ДБН В.2.5-20:2018. Газопостачання. Настанови щодо влаштування систем газового опалення, вентиляції та кондиціонування. – Київ: Мінрегіон України, 2018. – 156 с.

4 ASHRAE Standard 15-2022. Safety Standard for Refrigeration Systems. – Atlanta: American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, 2022. – 56 p.

5 ASHRAE Standard 34-2020. Designation and Safety Classification of Refrigerants. – Atlanta: ASHRAE, 2020. – 89 p. Bitzer. CO₂ Booster Systems Technical Guide. – Sindelfingen:

6.Bitzer Kühlmaschinenbau GmbH, 2024. – 124 с

7. Danfoss. AK-PC 782 Controller for CO₂ Systems. User Manual. – Denmark: Danfoss A/S, 2023. – 89 с. Güntner. Gas Cooler Selection for Transcritical CO₂ Applications. – Fürth:

					КРБ.ХУКП.1.499-03.1.3	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		82

- 8.Güntner GmbH & Co. KG, 2024. – 67 с. Alfa Laval. Plate Heat Exchangers for CO₂ Heat Recovery. Technical Data Sheet M10-BFM. – Lund: .Alfa Laval AB, 2023. – 12 с
- 10.. Grundfos. High Efficiency Circulator Pumps Magna3. Technical Manual. – Denmark: Grundfos A/S, 2023. – 56 с.
11. IPCC. 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. – Japan: IGES, 2006. – Vol. 3. – 490 p.
- 12.EU F-Gas Regulation (EU) No 517/2014. Fluorinated Greenhouse Gases. – Brussels: European Parliament, 2014. – 12 p.
- 13.Криофрост. Транскритичні CO₂ системи для супермаркетів. – Харків: Криофрост Інжиніринг, 2023. – 156 с.
- 14.Ралько Р.І. Транскритичні бустерні системи на CO₂. – Київ: Ралько, 2023. – 89 с.
- 15.Danfoss. CO₂ in Food Retail Applications. Technical Brochure. – Denmark, 2022. – 24 с.
- 16.Metro Cash & Carry Ukraine. Перша CO₂ система в Україні. – Київ, 2013. – 16 с.
- 17.Лобода В.В. Енергоефективні холодильні системи на природних холодоагентах: монографія. – Харків: ХНУРЕ, 2022. – 245 с.
- 18.Пилипенко О.М. Технології CO₂ в комерційному холодопостачанні: навч. посіб. – Одеса: ОНАХТ, 2021. – 189 с.
- 19.Сидоренко А.П. Гідравлічний розрахунок трубопроводів високого тиску в холодильних системах. – Київ: НАУ, 2020. – 134 с.
20. Федайлов Д.О. Автоматизація CO₂ бустерних систем: дис. ... канд. техн. наук. – Суми: СумДУ, 2023. – 167 с.
21. Коваленко І.В. Екологічна оцінка холодильних систем: монографія. – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. – 210 с.
- 22.Шевченко О.О. Енергоефективність систем холодопостачання супермаркетів. – Львів: ЛНУ ім. Франка, 2021. – 178 с.
23. Bitzer Software. Selection Program for CO₂ Compressors. Версія 7.8. – Sindelfingen, 2024. 24.Güntner Product Center. Gas Cooler Calculator v3.2. – Fürth, 2024.

					КРБ.ХУКП.1.499-03.1.3	Арк.
						83
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

25. Danfoss Coolselector®2. Refrigerant Properties Database. – Denmark, 2024.
26. МЕРП України. Коефіцієнти викидів парникових газів від спалювання палив. – Київ, 2023. – 34 с.
27. ДСТУ 8302:2015. Інформація та документація. Бібліографічне посилання. Загальні положення та правила складання. – Київ: Держспоживстандарт України, 2015. – 48 с.
28. ДСТУ 3582:2013. Інформація та документація. Скорочення слів у бібліографічних описах. – Київ: Держспоживстандарт України, 2013. – 112 с.
29. План А-1. Архітектурний план компактного супермаркету. Масштаб 1:75. – Одеса: Проектна група «ПівденБуд», 2025. – 12 арк.
30. Енергоаудит супермаркетів Одеської області. Звіт № 145/2025. – Одеса: Одеська ТЕЦ, 2025. – 78 с.

					КРБ.ХУКП.1.499-03.1.3	Арк.
						84
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		