

Дніпровський державний аграрно-економічний університет
Інженерно-технологічний факультет
Кафедра інжинірингу технічних систем

Пояснювальна записка
до дипломної роботи
освітнього ступеня "Магістр" на тему:
**Обґрунтування конструктивно-технологічних параметрів
охолоджувача молока**

Виконав: студент 2 курсу, групи МГАІ-3-23
за спеціальністю 208 «Агроінженерія»

_____ Ченчевич Богдан Юрійович

Керівник: _____ Алієв Ельчин Бахтияр огли

Рецензент: _____ Луц Павло Михайлович

Дніпро, 2024

**ДНІПРОВСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ
АГРАРНО-ЕКОНОМІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**
Інженерно-технологічний факультет

Кафедра інжинірингу технічних систем
Освітній ступінь: «Магістр»
Спеціальність: 208 «Агроінженерія»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

ІТС

(назва кафедри)

ДОЦЕНТ

(вчене звання)

Дудін В.Ю.

(підпис)

(прізвище, ініціали)

«12» листопада 2024 р.

**ЗАВДАННЯ
НА ДИПЛОМНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ**

Ченчевичу Богдану Юрійовичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи: Обґрунтування конструктивно-технологічних параметрів охолоджувача молока

керівник роботи: Алієв Ельчин Бахтияр огли, д-р техн. наук, старший дослідник

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

затверджені наказом вищого навчального закладу від

«12» листопада 2024 року № 3784

2. Строк подання студентом роботи 16.12.2024 року

3. Вихідні дані до проекту Огляд стану питання в галузі механізації тваринництва та існуючих технічних засобів для забезпечення первинної обробки молока. Патентний пошук, аналіз літературних джерел, останніх досліджень з обраної тематики.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) 1. Стан і напрями досліджень. 2. Порівняльні експериментальні дослідження охолоджувачів молока. 3. Чисельне моделювання охолоджувача молока. 4. Експериментальні дослідження удосконаленого охолоджувача молока на молочній фермі. 5. Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях. 6. Економічна ефективність удосконаленого охолоджувача. Висновки. Список використаних джерел. Додатки

5. Перелік демонстраційного матеріалу

1. Тема. Мета і задачі досліджень (2 аркуша, А4). 2. Стан і напрями досліджень (1 аркуш, А4). 3. Порівняльні експериментальні дослідження (1 аркуш, А4). 4. Результати моделювання (2 аркуша, А4). 3. Експериментальні дослідження (3 аркуша, А4). 5. Економічні показники (1 аркуш, А4). 6. Висновки (1 аркуш, А4)

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
1-6	Алієв Е. Б., професор	12.11.2024	09.12.2024
Нормоконтроль	Івлєв В. В., доцент	06.12.2024	09.12.2024

7. Дата видачі завдання: 12 листопада 2024 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломного проекту	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Аналітичний	до 14.11.2024 р	виконано
2	Теоретичний	до 21.11.2024 р	виконано
3	Експериментальний	до 28.11.2024 р	виконано
4	Охорона праці	до 02.12.2024 р	виконано
5	Економічний	до 06.12.2024 р	виконано
6	Демонстраційна частина	до 09.12.2024 р	виконано

Студент

_____ .
(підпис) Ченчевич Б. Ю.
(прізвище та ініціали)

Керівник роботи

_____ .
(підпис) Алієв Е. Б.
(прізвище та ініціали)

Ченчевич Б. Ю. Обґрунтування конструктивно-технологічних параметрів охолоджувача молока. Випускна кваліфікаційна робота на здобуття освітнього ступеня «Магістр» за спеціальністю 208 «Агроінженерія». ДДАЕУ, Дніпро, 2024.

Дослідження присвячено аналізу та вдосконаленню систем охолодження молока, зокрема на молочно-товарних фермах. У першому розділі розглянуто доцільність використання центрів охолодження молока та їх основні функції, а також описано конструктивні особливості резервуарів для охолодження. У другому розділі проведено порівняльні експериментальні дослідження різних типів охолоджувачів молока, визначено методику проведення експериментів і представлені результати, що підтверджують ефективність обраних рішень. Третій розділ присвячений чисельному моделюванню охолоджувача молока, де описані фізико-математичні аспекти та отримані результати, що демонструють переваги моделювання для оптимізації систем охолодження. У четвертому розділі наведено результати експериментальних досліджень вдосконаленого охолоджувача молока, реалізованого на молочної фермі, а також обґрунтовані висновки щодо його ефективності. П'ятий розділ акцентує увагу на охороні праці та безпеці в надзвичайних ситуаціях, що є важливим аспектом при експлуатації молочної установок. Останній розділ аналізує економічну ефективність удосконаленого охолоджувача молока, демонструючи його потенціал для зниження витрат і підвищення рентабельності виробництва.

Ключові слова: молочно-доїльне обладнання, молоко, охолоджувач, параметри, ефективність, моделювання, симуляція.

Апробація. Ченчевич Б. Ю. (2024). Обґрунтування конструктивно-технологічних параметрів охолоджувача молока. Збірник тез III Всеукраїнської науково-практичної конференції молодих вчених «Інжиніринг технологій і технічних систем агропромислового комплексу» (15 листопада 2024 р.). Частина 1. Інжиніринг технічних систем агропромислового виробництва. Дніпро. ДДАЕУ, 131–133.

ЗМІСТ

ВСТУП	6
1 СТАН І НАПРЯМИ ДОСЛІДЖЕНЬ	8
1.1 Обґрунтування доцільності центрів охолодження молока	8
1.2 Резервуари для охолодження молока	11
1.3 Висновки з розділу	21
2 ПОРІВНЯЛЬНІ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ОХОЛОДЖУВАЧІВ МОЛОКА.....	23
2.1 Постановка задачі	23
2.2 Аналітичний розрахунок і методика досліджень	24
2.3 Результати досліджень	26
2.4 Висновки з розділу	36
3 ЧИСЕЛЬНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ОХОЛОДЖУВАЧА МОЛОКА.....	37
3.1 Постановка задачі	37
3.2 Фізико-математичний апарат	37
3.3 Сіткова і фізична модель	40
3.4 Результати чисельного моделювання	42
3.4 Висновки з розділу	45
4 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ УДОСКОНАЛЕНОГО ОХОЛОДЖУВАЧА МОЛОКА НА МОЛОЧНІЙ ФЕРМІ.....	46
4.1 Постановка задачі моделювання	46
4.2 Методика досліджень	47
4.3 Результати досліджень	52
4.4 Висновки з розділу	66
5 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ	67
6 ЕКОНОМІЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ УДОСКОНАЛЕНОГО ОХОЛОДЖУВАЧА МОЛОКА	70
ВИСНОВКИ.....	73
Бібліографія	75
Додатки	79

ВСТУП

В багатьох країнах, що розвиваються, сільське господарство відіграє важливу роль у забезпеченні продовольчої безпеки, зайнятості та національному доходу. Малий та середній молочний сектор надає можливість виробникам молока отримувати регулярний та сталий дохід завдяки створенню надійних ринків для свіжого молока та молочних продуктів. Схеми збору молока забезпечують як безпечний ринок, так і спосіб зменшення втрат шляхом збору та збереження свіжого молока, що дозволяє виготовляти якісні та поживні молочні продукти на сталій основі. Такі схеми також забезпечують регулярний грошовий потік і доходи з міських районів у сільські місцевості.

Малий та середній молочний сектор приносить численні переваги, через які дрібні виробники та приватний сектор можуть мобілізувати підтримку для розвитку агропідприємств. До цих переваг відносяться: зменшення бідності завдяки регулярному сімейному доходу; створення позафермерських робочих місць; екологічні переваги від економічних та сталих варіантів охолодження молока; ефективні варіанти енергозбереження; покращення продовольчої безпеки та харчування в домогосподарствах.

Схеми збору молока відрізняються залежно від країни, і жодна схема не може бути застосована універсально. Сире молоко є швидкокопсувним продуктом, яке потрібно збирати і охолоджувати протягом кількох годин, щоб зменшити втрати через псування та зберегти якість. Оскільки виробництво молока часто віддалене від ринків і переробних підприємств, центри охолодження молока (ЦОМ) забезпечують збереження якості через охолодження та гігієнічне зберігання до подальшого транспортування на переробні підприємства. У багатьох країнах, що розвиваються, відсутність ЦОМ є основним обмеженням для розвитку сталих молочних ланцюгів. Це головним чином пов'язано із відсутністю відповідного обладнання для охолодження.

Тому **метою роботи** є удосконалення конструкції охолоджувача молока та обґрунтування його конструктивно-режимних параметрів.

1 СТАН І НАПРЯМИ ДОСЛІДЖЕНЬ

1.1 Обґрунтування доцільності центрів охолодження молока

Молоко можна охолоджувати у два етапи: попереднє охолодження, за яким слідує охолодження за допомогою охолоджувача до 4 °С. Витрати на охолодження в ЦОМ можна зменшити, попередньо охолоджуючи тепле молоко за допомогою води з водопроводу, поверхневої, колодязної або ґрунтової води. Попереднє охолодження зменшує навантаження на холодильне обладнання, тим самим знижуючи витрати та енергетичні потреби. Коли різниця температур між водою з водопроводу/колодязем і свіжим сирим молоком значна, витрати на охолодження можуть зменшитися до 64 %.

Остаточна температура попередньо охолодженого молока залежить від різниці температур між водою для попереднього охолодження і свіжим молоком. Потім вибирається, чи використовувати систему прямого розширення для охолодження молока, резервуари для охолодження молока з льодовими банками або охолодження за допомогою плитових теплообмінників в поєднанні з ізольованим, неохолоджуваним резервуаром для зберігання молока. Останні дві системи накопичують лід протягом більше десяти годин і краще підходять для місць, де електропостачання надійне, де доступна тільки однофазна мережа і/або де застосовується нижчий тариф на споживання електроенергії вночі. Існує дев'ять варіантів охолодження і зберігання молока, які варіюються від простих систем прямого розширення до більш розвинених і складних інтегрованих систем, що включають енергозберігаюче попереднє охолодження з льодовими банками і миттєве охолодження. Переваги і обмеження кожного варіанту оцінюються і представлені в цій публікації. Оптимальна технологія або система охолодження молока залежить від: місця розташування; наявності електрики та води; вимог до потужності; капітальних та експлуатаційних витрат. Основний висновок – це очевидна вигода від використання попереднього охолодження для зменшення

загальних потреб в електроенергії та капітальних і експлуатаційних витрат ЦОМ (рис. 1.1).

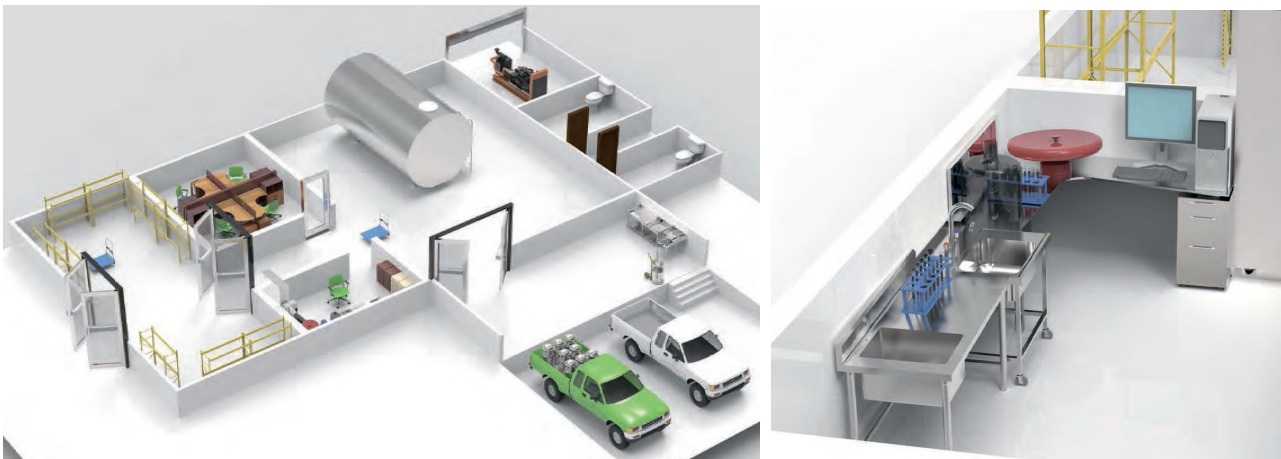


Рисунок 1.1 – Будова центра охолодження молока

Виявлені дев'ять варіантів:

1. Резервуар для охолодження молока з прямим розширенням;
2. Резервуар для охолодження молока з прямим розширенням з попереднім охолодженням за допомогою води з водопроводу або колодязя;
3. Резервуар для охолодження молока з попереднім охолодженням за допомогою води з водопроводу або колодязя, за яким слідує миттєве охолодження за допомогою льодової води з установки для виготовлення льоду;
4. Інтегрований резервуар для охолодження молока з льодовим банком;
5. Інтегрований резервуар для охолодження молока з льодовим банком з попереднім охолодженням за допомогою води з водопроводу або колодязя;
6. Попереднє охолодження молока за допомогою попередньо охолодженої води з водопроводу з інтегрованого резервуара для охолодження молока з льодовим банком;
7. Резервуар для охолодження молока з льодовим банком з попереднім охолодженням за допомогою води з водопроводу або колодязя, за яким слідує

миттєве охолодження за допомогою льодової води з інтегрованого льодового банку;

8. Миттєве охолодження молока за допомогою пластинчастого теплообмінника і резервуара з льодовим банком;

9. Контейнеризований ЦОМ.

Підприємства, що планують створення ЦОМ, повинні мати базовий план вимог щодо розташування і способу створення об'єкта. Також слід враховувати технічні рекомендації щодо будівель, послуг та обладнання, а також конфігурації, що забезпечують максимальні переваги при мінімальних витратах, включаючи технології енергозбереження. Наявність рекомендацій також забезпечує можливість застосування стандартів та найкращих практик. Вимоги для створення ЦОМ відрізняються залежно від країни, тому слід провести дослідження для визначення факторів, що стосуються конкретного ЦОМ.

Електрична енергія є ключовою вимогою для функціонування центру охолодження, і коли електропостачання відсутнє або ненадійне, часто використовуються резервні генератори. Альтернативні джерела електроенергії з відновлювальних джерел, переважно сонячного випромінювання та вітрової енергії, можуть запропонувати рішення, але високі капітальні витрати та обмежена надійність таких систем наразі роблять їх використання сумнівним.

Більшість холодильних систем для охолодження молока потребують постійного постачання однофазної або трифазної змінної електричної енергії. Сонячні фотоелектричні (PV) та/або вітрові системи можуть бути варіантами для забезпечення безперервного постачання електроенергії для відносно невеликого ЦОМ, але потребують значних початкових інвестицій, а необхідне зберігання енергії суттєво збільшує витрати, особливо коли потрібно замінювати батареї. Альтернативні джерела енергії для ЦОМ найкраще працюють на відносно невеликій шкалі для автономних застосувань і найзручніше використовуються у

поєднанні з технологією зберігання без батарей (наприклад, льодові банки, хімічне зберігання та прямоприводні холодильники).

1.2 Резервуари для охолодження молока

Існує два типи охолоджувачів молока: *бак з льодовим банком (IBT)* і *система прямого розширення (DX)*. Для системи DX доступні два типи баків: один, в якому охолоджуючий газ тече всередині мідних труб навколо поверхні баку для охолодження молока, що дозволяє передачу тепла від молока до охолоджувача; і інший, в якому охолоджуючий газ проходить через спеціально спроектовану нержавіючу стінку (з пластинами з виступами, подушками або DX-пластинами), одна сторона якої служить як камера для молока, а інша покрита ізоляційним матеріалом. Термін «пряме розширення» зазвичай відноситься до другого типу охолоджувача молока.

Охолоджувальна потужність охолоджувального агрегату в будь-якій системі визначається потужністю баку для молока. Баки часто проєктують для охолоджувальних вимог більших молочних ферм, які доять двічі на день, а отже, потрібні два охолодження – одне вранці і одне ввечері. Перерва між доїнням і охолодженням молока не повинна перевищувати проміжок часу від двох до чотирьох годин. Охолоджувальні системи проєктуються з потужностями, які відповідають тепловому навантаженню в пікові часи. Однак, якщо бак заповнюється лише один раз на день для швидкого охолодження до 4 °C, система охолодження потребуватиме значно більшої потужності. Хоча бак з льодовим банком охолоджує молоко швидше, ніж DX-бак, всі системи охолодження проєктуються так, щоб охолоджувати будь-який об'єм молока до 10 °C протягом двох годин і до 4 °C протягом чотирьох годин.

Баки для охолодження та зберігання молока повинні бути виготовлені з нержавіючої сталі стандарту харчової якості, відповідно до міжнародних

організацій, таких як Міжнародна організація зі стандартизації (ISO 304 SS Stainless steel), Американський інститут заліза і сталі (AISI 18/10) або еквівалентних (FAO, 2010). Нержавіюча сталь нижчої якості має більшу ймовірність корозії. Усі баки мають дві або три стінки і добре ізольовані за допомогою спресованої поліуретанової піни або розширеного полістиролу, щоб зберігати молоко холодним принаймні 12 годин з підвищенням температури не більше ніж на 1 °C при температурі навколишнього середовища 30 °C. Охолоджувальна система може бути типу DX або використовувати льодовий банк у основі баку.

Баки для охолодження молока можуть бути двох типів: відкриті або повністю закриті.

Відкриті баки. Кришка відкритого баку (рис. 1.2, а) може бути частково або повністю відкритою для доступу. Це дозволяє наливати молоко в бак і спрощує доступ для ручного очищення та санітарії. Відкриті баки мають ємність від 200 до 2500 літрів. Такі баки можуть не потребувати насосів для наливу молока і можуть очищатися вручну, що робить їх дуже підходящими для використання в сільських районах країн, що розвиваються та країнах у перехідному періоді.

Повністю закритий бак (рис. 1.2, б) відрізняється структурно від відкритого тим, що не має великого отвору для доступу. Багато закритих баків мають стандартний розмір доступу на верхній частині або на боковині. Цей доступний отвір зазвичай призначений для періодичного спостереження за баком через отвір, але він має бути достатньо великим, щоб середньорозмірна доросла людина могла увійти в бак. Молоко накачується з закритого баку, а система очищення на місці (СОМ) використовується для очищення баку та обладнання. Очищувальний агент (вода, луг або кислота) циркулює через систему з або без демонтажу очищеного обладнання. Система СОМ може бути інтегрована в бак або бути окремим пристроєм, що вимагатиме додаткових капіталовкладень.

Ємність закритих баків варіюється від 3 000 до 10 000 літрів. Додаток 2 надає деталі про очищення ЦОМ, включаючи системи СОМ.



а



б

Рисунок 1.2 – Резервуари для охолодження молока: відкриті (а) та закриті (б)

У відкритих і закритих баках необхідно забезпечити безперервне перемішування молока під час охолодження. Молоко, яке не перемішується, не буде рівномірно охолоджене – молоко, що контактує з стінкою баку, замерзає, тоді як молоко в центрі баку залишається теплим, що призводить до деградації якості молока. Відкриті баки зазвичай мають один або кілька вертикальних

агітаторів, встановлених на верху баку. Закриті баки можуть мати один або кілька агітаторів, встановлених на верху або боках.

Бак може бути відкалібрований для вимірювання об'єму молока. Калібрування зазвичай здійснюється в об'ємних вимірюваннях, таких як літри або галони, але деякі баки калібруються за вагою – кілограми або фунти.

Баки для охолодження молока мають різні аксесуари залежно від розміру, типу та виробника баку. Зазвичай встановлюються агітатори для забезпечення адекватного та швидкого охолодження, а також термостати та термометри для контролю та індикації температури молока. Для очищення та санітарії закритих баків, оснащених інтегрованими автоматичними системами СОМ, потрібні спеціальні миючі засоби. У багатьох країнах ці миючі засоби недоступні і їх доведеться імпортувати. У країнах, що розвиваються, часто рекомендується використовувати неінтегровану, вручну керовану систему СОМ.

Попереднє охолодження теплого свіжого молока за допомогою води з водопроводу або колодязя суттєво знижує енергетичні потреби охолоджувальної системи, тим самим знижуючи витрати на охолодження. Попереднє охолодження за допомогою води з водопроводу/колодязя та охолодженої води може бути здійснено за одну операцію. Використання лише охолодженої води прискорює процес охолодження та допомагає підтримувати якість молока.

Один з основних факторів, що сприяють збільшенню витрат на експлуатацію, – це швидке зростання витрат на енергію. Важливо вибрати правильний тип системи охолодження з урахуванням споживання енергії, і цей вибір буде залежати від джерела та вартості енергопостачання. Конструкція та якість обладнання також безпосередньо вплине на споживання енергії. Існують міжнародні стандарти для охолоджувальних баків для молока (ISO, 2011), а деякі країни чи регіони мають свої власні стандарти. Розвиваються і перехідні країни все частіше виготовляють власне обладнання для охолодження молока.

Наявність електропостачання визначить тип системи охолодження молока, яку буде використовувати в запропонованому ЦОМ. Наявна електрична потужність може бути однофазною або трифазною. Якщо електропостачання ненадійне або відсутнє, можуть бути використані дизельні електрогенератори або альтернативні джерела енергії, такі як сонячна енергія. При використанні дизельних генераторів найбільш ефективним енергетичним варіантом є використання систем охолодження молока типу DX з трифазними охолоджувачами. Баки, виготовлені з DX або димчастих пластин, значно енергоефективніші, ніж інші. Системи DX можуть охолоджувати молоко щонайменше в 1,5 рази швидше, ніж мідні баки порівнянного розміру.

Баки для охолодження та зберігання молока з льодовим банком (рис. 1.3) використовують льодовий банк та резервуар з охолодженою водою, розташовані в основі баку. Цей резервуар містить випарник охолоджувальної системи і протягом багатьох годин дозволяє наростання льоду на мідних трубках випарника. Лід може бути до 8 см завтовшки. Може бути встановлено пристрій для контролю товщини льоду, щоб уникнути надмірного утворення льоду, що може пошкодити обладнання, і контролювати використання енергії та витрати на експлуатацію.

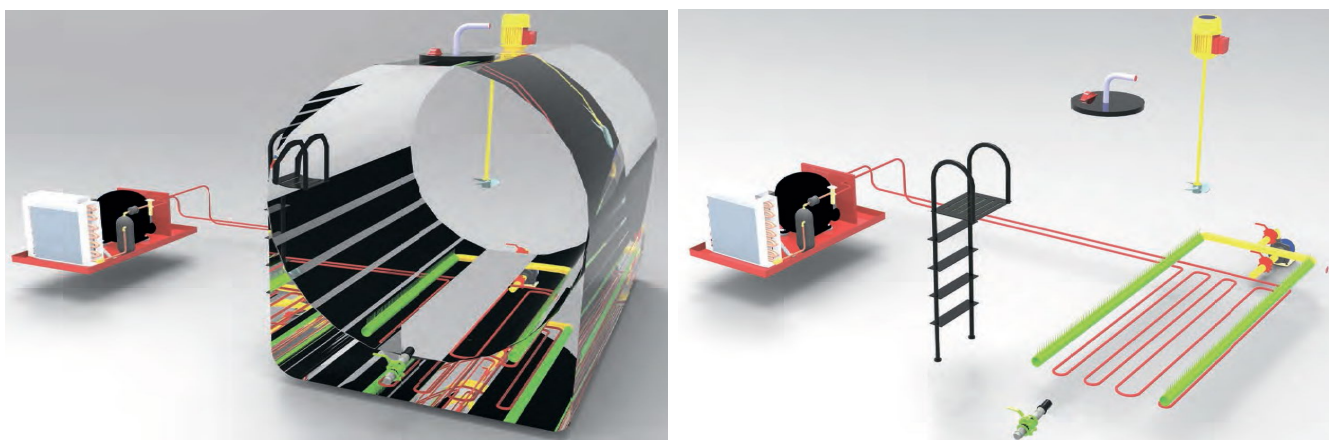


Рисунок 1.3 – Баки для охолодження та зберігання молока з льодовим банком

Коли молоко доять двічі на день, зберігання льоду зазвичай здатне охолоджувати 60–70 відсотків молока в баку. Системи охолодження з льодовими банками найкраще підходять для районів з надійним електропостачанням, оскільки вони повинні працювати принаймні десять годин на день. Сонячні панелі також можуть використовуватися як джерело електроенергії для генерації льоду, але живлення системи охолодження льодовим банком тільки дизельним генератором буде дорогим.

Для швидшого охолодження теплого молока, вода з льодом подається на розпилювачі, розташовані на зовнішній стороні та верхній частині внутрішнього баку. Баки з льодовими банками можуть охолоджувати молоко до 50 відсотків швидше, ніж DX-бак. Рис. 1.4 ілюструє розташування закритого баку для охолодження молока з льодовим банком.

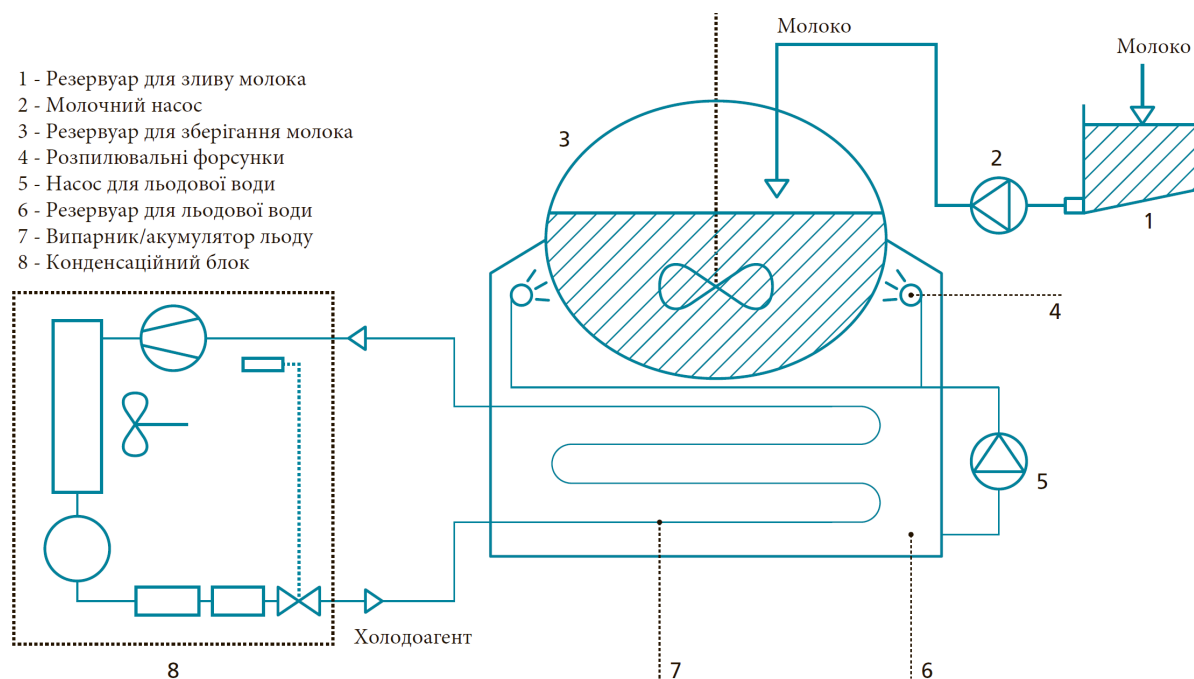


Рисунок 1.4 – Баки для охолодження та зберігання молока з льодовим банком

Багато сучасних баків оснащені складними електронними системами керування. Такі системи чутливі до нестабільних умов навколишнього середовища

і потребують уваги спеціалізованих інженерів. Якщо є можливість, у країнах, що розвиваються, слід використовувати простіші системи керування.

Льодові генератори або банки призначені для генерації та зберігання охолоджувальної потужності для подальшого використання в процесах, що використовують охолоджену воду. Лід генерується в періоди непікових навантажень, накопичуючи достатню охолоджувальну потужність (у вигляді льоду) для задоволення щоденних потреб і/або дозволяючи використовувати менше компресорне обладнання, ніж необхідне для миттєвого охолодження. Охолодження з охолодженою водою в льодовому генераторі зазвичай вимагає використання пластинчастих теплообмінників або трубчастих теплообмінників.

Для забезпечення миттєвого охолодження до 4 °C може бути встановлений теплообмінник, який використовує воду з льодом з резервуара в конструкції баку як охолоджуючий засіб. Миттєве охолодження допоможе підтримувати якість молока.

Енергетичні вимоги для баків для охолодження молока з льодовим банком можуть бути низькими, якщо однофазний компресор використовується протягом тривалого часу для створення льодового банку. Ці компресори можуть працювати 10–16 годин на день при наявності надійного електропостачання. Охолодження з льодовими банками також має переваги в тому, що потребує меншої потужності компресора і дозволяє використовувати дешеву нічну електрику, якщо така є, або однофазне електричне живлення.

Охолодження молока прямим розширенням і резервуари для зберігання.

Резервуари для охолодження та зберігання молока з системою DX (direct expansion) використовують трубки випарника холодильного агента або спеціально розроблені плоскі пластини у формі подушки, які кріпляться до зовнішньої сторони резервуара, що містить молоко (рисунки 1.5 та 1.6). Резервуари в цій системі набагато менші, ніж резервуари для охолодження з льодовим банком, оскільки вони не мають резервуару для охолодженої води. Системи DX також можуть бути на 50% енергоефективнішими, ніж системи охолодження з льодовим

банком, але вимагають більших компресорів. Холодильний компресор працює постійно під час охолодження, тому споживання енергії є високим протягом короткого періоду від чотирьох до восьми годин на день.



Рисунок 1.5 – Поперечний переріз закритого резервуара для охолодження молока прямого розширення

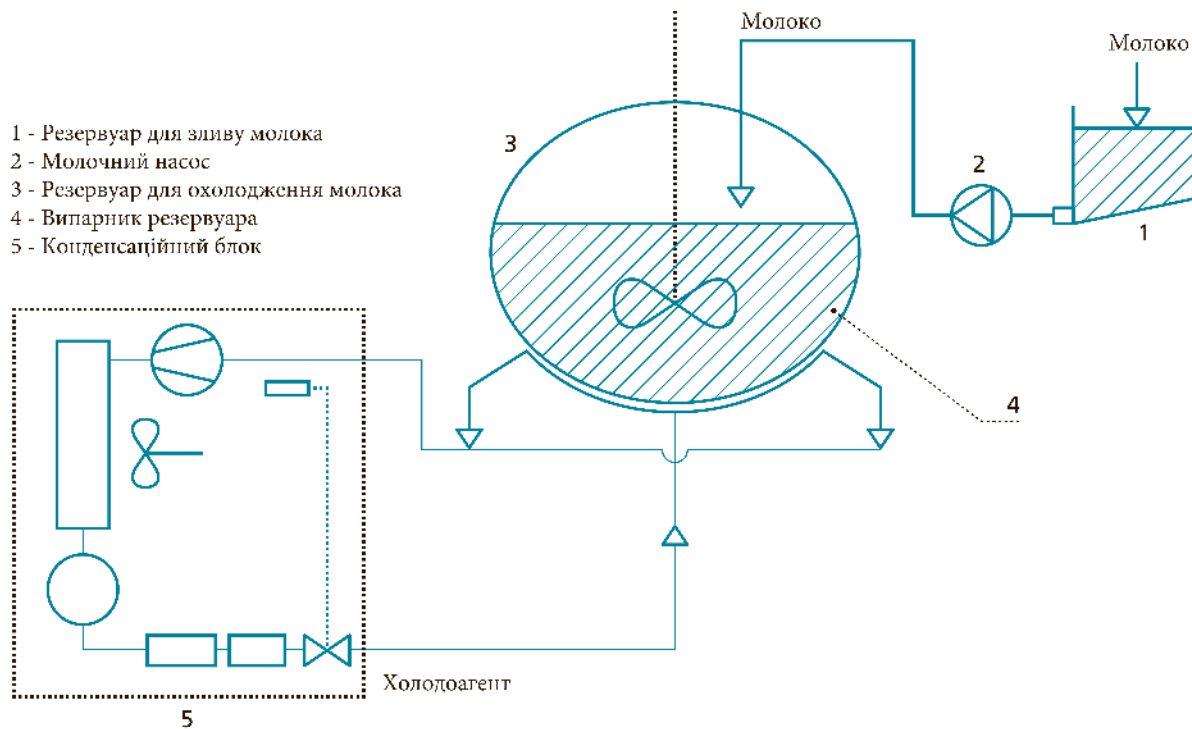


Рисунок 1.6 – Закрита система охолодження молока прямого розширення

Генератори льоду та миттєве охолодження. Генератори льоду (акумулятори льоду) є, по суті, великими резервуарами води, що містяться у добре ізольованих баках, у яких розміщені трубки випарника холодильного агента (рисунок 1.7). Зазвичай холодильний компресор та конденсатор змонтовані на тій самій опорній рамі, що й резервуар для води. Установка призначена для накопичення льоду на трубках випарника безперервно або під час, коли тарифи на електроенергію найнижчі. Зазвичай використовуються компресори на однофазну напругу. Об'єм льодової води в генераторах льоду, що використовуються на центрах охолодження молока (МСС), варіюється від 600 літрів льодової води/200 кг льоду до 4000 літрів льодової води/2000 кг льоду. Накопичена охолоджувальна здатність може використовуватися під час періодів пікового попиту. З використанням теплообмінника свіже тепле молоко може бути миттєво охолоджене до 4 °С.



Рисунок 1.7 – Резервуар для льоду

Обладнання для попереднього охолодження молока. Попереднє охолодження свіжого теплого молока на МСС значно зменшує витрати на

енергію. Крім того, якщо для попереднього охолодження використовується вода з водопроводу або свердловини (бажано з температурою, яка щонайменше на 15 °С нижча за температуру молока), можливо використовувати холодильну установку з меншою потужністю, тим самим знижуючи капітальні витрати на створення МСС. Однак попереднє охолодження потребує додаткового обладнання, включаючи балансувальний/сливний резервуар, водяні та молочні насоси, теплообмінник і трубки з фітингами.

Найбільш часто використовуються пластинчасті або трубчасті теплообмінники, причому перші є найбільш поширеними та ефективними. Крім того, охолоджувальну здатність теплообмінника можна збільшити або зменшити, на відміну від трубчастих теплообмінників. Однак трубчасті теплообмінники менш схильні до забруднення та мають менші вимоги до обслуговування. Теплообмінник складається з серії тонких гофрованих сталевих пластин, затиснутих разом в опорну раму (рисунок 1.8). Вода протікає з одного боку кожної пластини, тоді як тепле молоко тече з іншого боку у протилежному напрямку (рисунок 1.8). Тепло передається від молока до води через пластини.

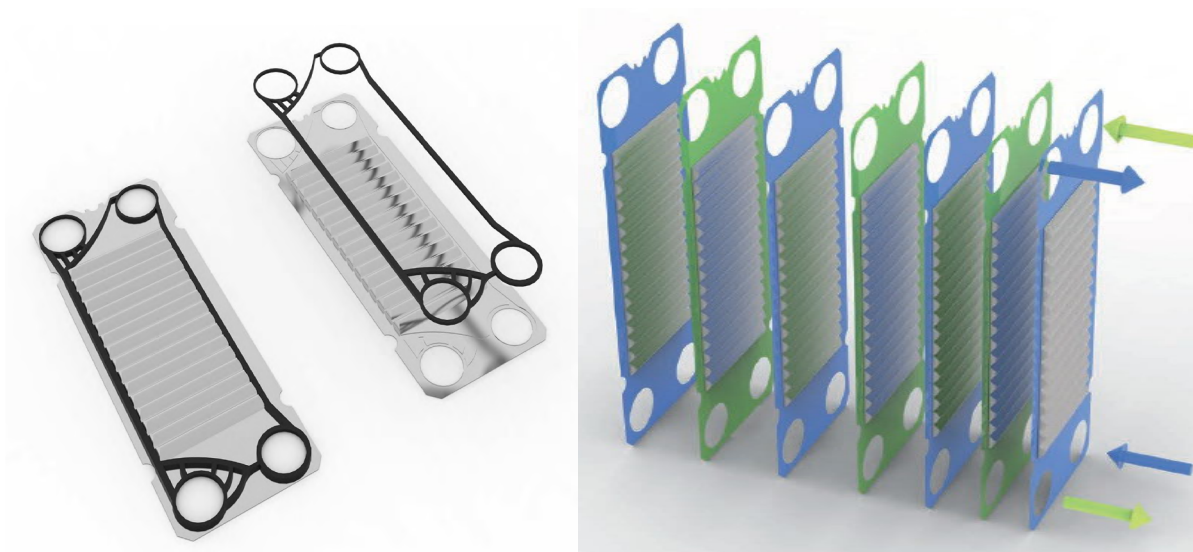


Рисунок 1.8 – Схема теплообміну в пластинчастому теплообміннику

Установки для рекуперації тепла. Холодильні системи генерують значну кількість тепла, яке відводиться в конденсаторі. Частина цього тепла можна використати для підігріву води для очищення обладнання молочного заводу. Холодоагент, що виходить з компресора (перед тим, як потрапити в конденсатор) у системі охолодження молока, має температуру 70–80 °С. Установка для рекуперації тепла – це ізольований резервуар для води, через який проходять трубки з холодоагентом. Тепло від газу передається воді. Установка для рекуперації тепла може попередньо підігріти воду до 45–60 °С, але фактичне відновлення тепла залежить від початкової температури води при її надходженні в резервуар.

1.3 Висновки з розділу

1. Центри охолодження молока (ЦОМ) відіграють важливу роль у забезпеченні якості молока шляхом ефективного охолодження. Запропонована двоетапна система охолодження, що включає попереднє охолодження і подальше охолодження до 4 °С, дозволяє значно зменшити енергетичні витрати. Впровадження попереднього охолодження за допомогою доступних водних ресурсів, таких як водопровідна, колодязна або ґрунтова вода, допомагає знизити навантаження на холодильне обладнання і економить до 64 % витрат на охолодження, залежно від температурної різниці між водою і молоком. Розглянуто дев'ять різних варіантів систем охолодження молока, які можуть бути адаптовані залежно від умов, таких як доступ до електроенергії та води, капітальні та експлуатаційні витрати. Вибір оптимальної технології охолодження повинен враховувати специфіку регіону, особливості інфраструктури та вимоги до ефективності. Крім того, важливо забезпечити надійність електропостачання, оскільки більшість охолоджувальних систем потребує стабільного джерела електроенергії. Вирішення питання з відновлюваними джерелами енергії, такими

як сонячні та вітрові системи, може бути ефективним, проте їх реалізація пов'язана з великими початковими інвестиціями. Таким чином, ключовими аспектами для успішного функціонування ЦОМ є економічна ефективність, надійність постачання енергії, технологічна оптимізація і дотримання екологічних стандартів, що забезпечить зниження загальних витрат на охолодження молока і покращення його якості.

2. У системах охолодження молока використовуються два основні типи резервуарів: з льодовим банком (ІВТ) та системи прямого розширення (DX). Обидва типи мають свої переваги та недоліки, які залежать від обсягу молока, що охолоджується, енергетичних потреб і вимог до зберігання. Резервуари ІВТ, зазвичай, забезпечують швидше охолодження, здатні охолоджувати молоко до 10 °С за дві години та до 4 °С за чотири години, а також ефективно зберігають холод при належній ізоляції. Водночас системи DX відрізняються компактністю та енергоефективністю, але потребують більших компресорів і постійного енергопостачання. Обидва типи резервуарів можуть бути відкритими або закритими, при цьому відкриті резервуари забезпечують простіший доступ для очищення, тоді як закриті системи гарантують кращу гігієну. Важливим аспектом є безперервне перемішування молока, що запобігає його нерівномірному охолодженню. Системи, що використовують попереднє охолодження з водою, можуть суттєво знизити енергетичні витрати. Вибір системи охолодження має враховувати надійність електропостачання, доступні технології очищення та специфічні умови експлуатації, щоб забезпечити ефективне охолодження та зберігання молока, відповідно до міжнародних стандартів.

2 ПОРІВНЯЛЬНІ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ОХОЛОДЖУВАЧІВ МОЛОКА

2.1 Постановка задачі

Ємності для охолодження молока виготовляються у вертикальній та горизонтальній конструкціях. Моделі вертикальних і горизонтальних баків показані на рисунку 2.1.

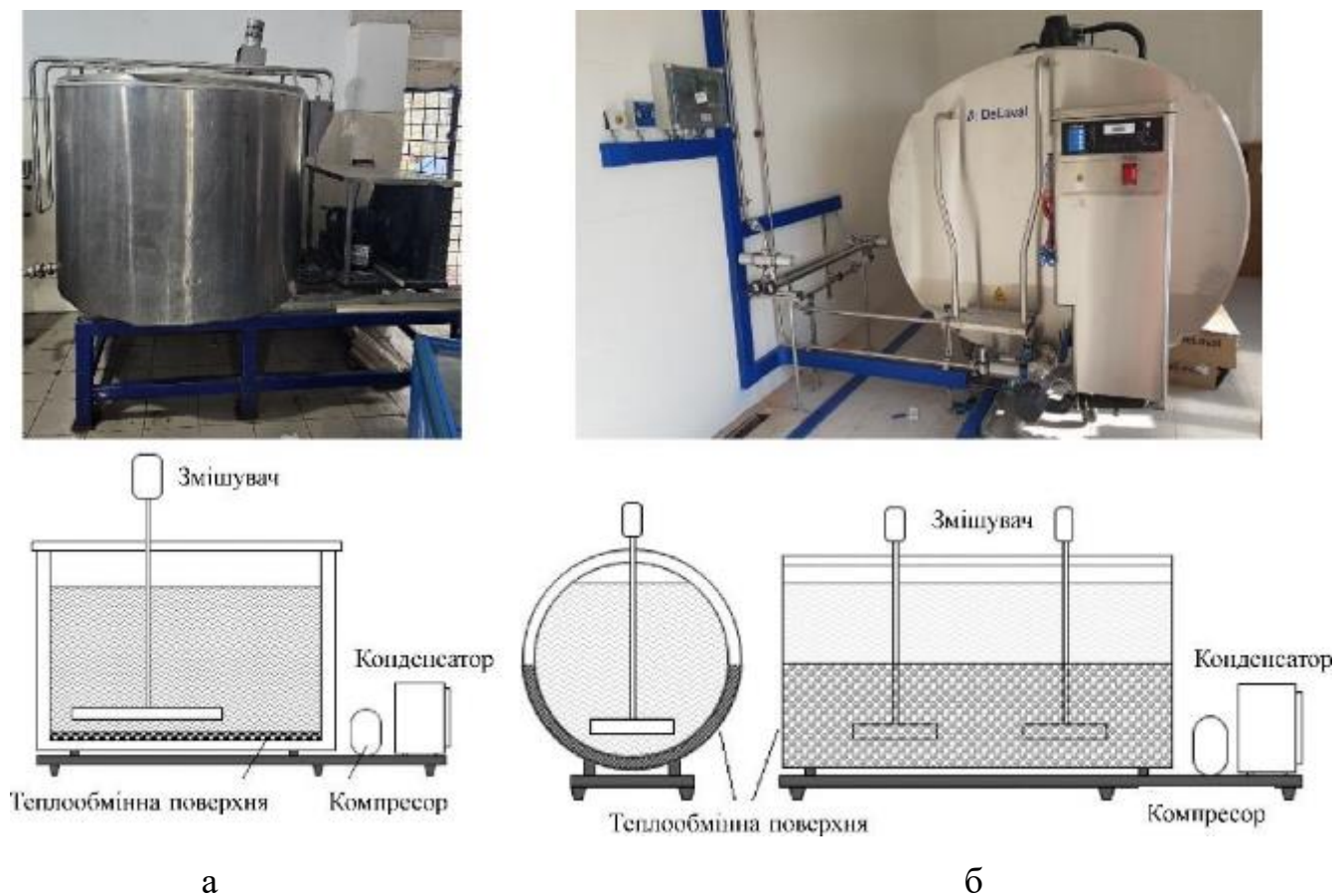


Рисунок 2.1 – Вертикальні (а) та горизонтальні (б) моделі ємностей для охолодження молока

У вертикальних ємностях охолоджувальна поверхня охоплює всю основу, тоді як у горизонтальних ємностях охолоджувальна поверхня становить половину

основи. Обидві моделі ємностей виготовляються з нержавіючої сталі AISI 304 та розроблені з урахуванням зручності для зливу та очищення. Товщина ємності в обох моделях становить 2,5 мм. Перемішування є необхідним для ємностей з охолодженням молока, тому у всіх типах ємностей використовується потужність перемішування 40 Вт на тонну.

Система охолодження ємності працює з використанням газу R404A. Згідно з Монреальським протоколом, хлорфторвуглецеві (CFC) і гідрохлорфторвуглецеві (HCFC) холодоагенти були замінені на гідрофторвуглецеві (HFC) холодоагенти, які є абсолютно безпечними для озонового шару, не містять парникових газів і мають нульовий озоноруйнівний потенціал (ODP) відповідно до Кіотського протоколу.

2.2 Аналітичний розрахунок і методика досліджень

Рівняння для холодоагенту R404A можна використовувати для оцінки коефіцієнта теплопередачі зовні або всередині оболонки:

$$h_r = \max\{h_{nb}, h_{cb}\}, \quad (2.1)$$

$$h_{nb} = (0.6683Co^{-0.2}fFr + 1058Bo^{0.7}F_{fl})(1-x)^{0.8}h_{lq}, \quad (2.2)$$

$$h_{cb} = (1.136Co^{-0.9}fFr + 667.2Bo^{0.7}F_{fl})(1-x)^{0.8}h_{lq}, \quad (2.3)$$

$$h_{lq} = 0.023Re^{0.8}Pr^{0.4}(k/D). \quad (2.4)$$

де F_{fl} – параметр, що залежить від рідини, і його значення варіює в межах від 0,5 до 5,0. Значення F_{fl} для холодоагенту R404A приймається як 1,3. Припускаючи, що тепловтрати не враховуються, рівняння енергетичного балансу можна записати для перехідної теплопередачі:

$$U.A.(T_p - T_r) = m.c.\frac{dT_p}{dt}, \quad (2.5)$$

де m – маса продукту в ємності, а c – середня питома теплоємність продукту.

Інтегрування обох сторін дає:

$$\frac{U.A}{m.c} \cdot t = \ln \left[\frac{T_o - T_r}{T_p - T_r} \right]. \quad (2.6)$$

Отже, температура продукту може бути отримана наступним чином:

$$T_p = T_r + (T_i - T_r) \cdot e^{-\left[\frac{U.A}{m.c} \cdot t\right]}, \quad (2.7)$$

Таким чином, отримується кореляція з загальним коефіцієнтом теплопередачі, площею стінки ємності, що контактує з продуктом, масою продукту в ємності, середньою питомою теплоємністю продукту, початковою температурою продукту, температурою холодоагенту та періодом охолодження. Відповідно, температуру продукту в кінці будь-якого періоду часу можна обчислити за рівнянням (2.7). Зважаючи на бажану температуру молока, рівну 4 °С, період охолодження є визначеним значенням, яке залежить від класифікацій продуктивності для ємностей охолодження молока. Щоб досягти бажаної температури, передаючи тепло з найменшої можливої площі за мінімальний час, необхідно виготовити ємність з мінімальними витратами на основі інженерного підходу. Тому значення загального коефіцієнта теплопередачі також є важливим.

Температура охолоджуючого холодоагенту на вході в випарник варіюється від 7 °С до -2 °С протягом періоду охолодження. Необхідно, щоб температура холодоагенту не була меншою за -2 °С, поки температура молока становить 4 °С, інакше молоко, що контактує з охолоджувальною поверхнею, починає замерзати. Температурний діапазон холодоагенту, що залежить від часу, є однаковим для всіх типів і місткостей ємностей. Це означає, що обрані компресори та конденсатори відповідають умовам охолодження.

Для експериментальних досліджень використовувались термопари, які калібруються для кожного циклу. Вони мають точність $\pm 0,1$ °С. Відносні та абсолютні помилки розраховуються з урахуванням максимального значення 35 °С

та мінімального значення $4\text{ }^{\circ}\text{C}$ для температури з боку продукту, а також максимального значення $7\text{ }^{\circ}\text{C}$ і мінімального значення $-2\text{ }^{\circ}\text{C}$ з боку холодоагенту. Експериментальна невизначеність температурної різниці між продуктом і холодоагентом становить $\pm 5\%$ або $\pm 1,4\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Ємності ізольовані шаром поліуретанової матеріалу товщиною 50–55 мм. Тепловтрати в навколишнє середовище розраховані як 32 Вт.

Потужності компресорів і конденсаторів, які використовуються в ємностях для охолодження, визначаються відповідно до кількості молока та тривалості охолодження. Для цього необхідно знати теплопередачу від поверхні випаровування, яка контактує з молоком. Часові температурні криві молока використовуються для розрахунку загального коефіцієнта теплопередачі.

2.3 Результати досліджень

У дослідженні були вивчені ємності для охолодження різних типів і місткостей, і експериментально визначені характеристики охолодження у вигляді залежності часу t (с) від температури T ($^{\circ}\text{C}$). Рівняння (2.7) було підтверджено за допомогою експериментальних діаграм t – T . На рисунках 2.2 та 2.3 показані експериментальні та теоретичні криві охолодження для вертикальних та горизонтальних ємностей відповідно.

Загальний коефіцієнт теплопередачі залежить від теплопередачі на стороні продукту та холодоагенту. Експериментальні дані та розрахункові значення показують, що коефіцієнт тепловіддачі на стороні продукту є обмежуючим фактором. Загальний коефіцієнт теплопередачі має певну межу значення, яка залежить від швидкості перемішування, оскільки молоко і його жири відокремлюються одне від одного. Бажана температура молока і класифікації продуктивності для ємностей охолодження молока стандартизовані EN 13732.

Відповідно до цього стандарту, процес охолодження молока з 35 °С до 4 °С повинен тривати не більше 3,5 годин.

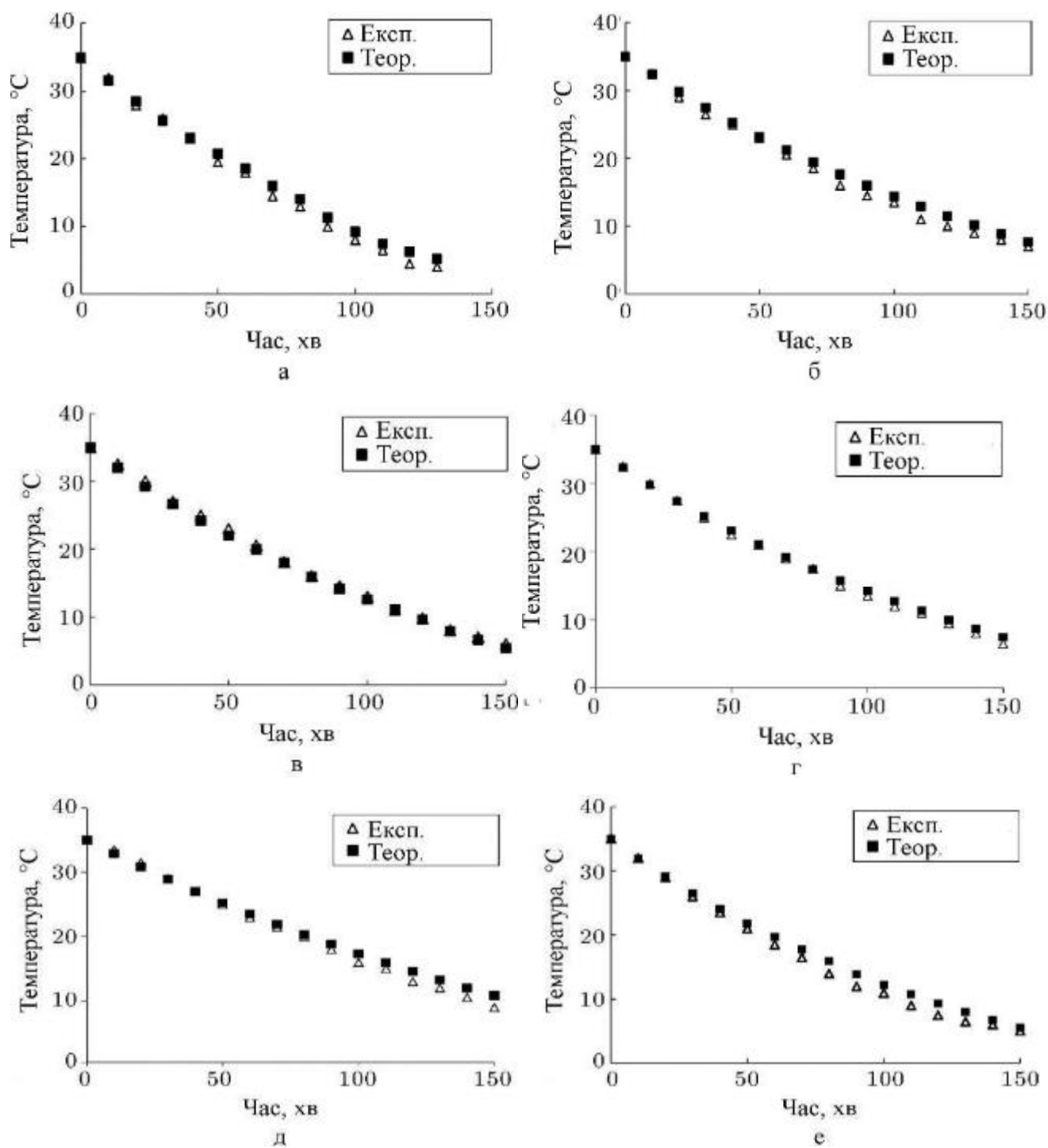


Рисунок 2.2 – Експериментальні та теоретичні криві охолодження для вертикальних ємностей: а – 300 л, б – 500 л, в – 1000 л, г – 1500 л, д – 1850 л, е – 2000 л

На рисунках 2.4 і 2.5 показані залежності загальних коефіцієнтів теплопередачі від часу для вертикальних та горизонтальних ємностей відповідно.

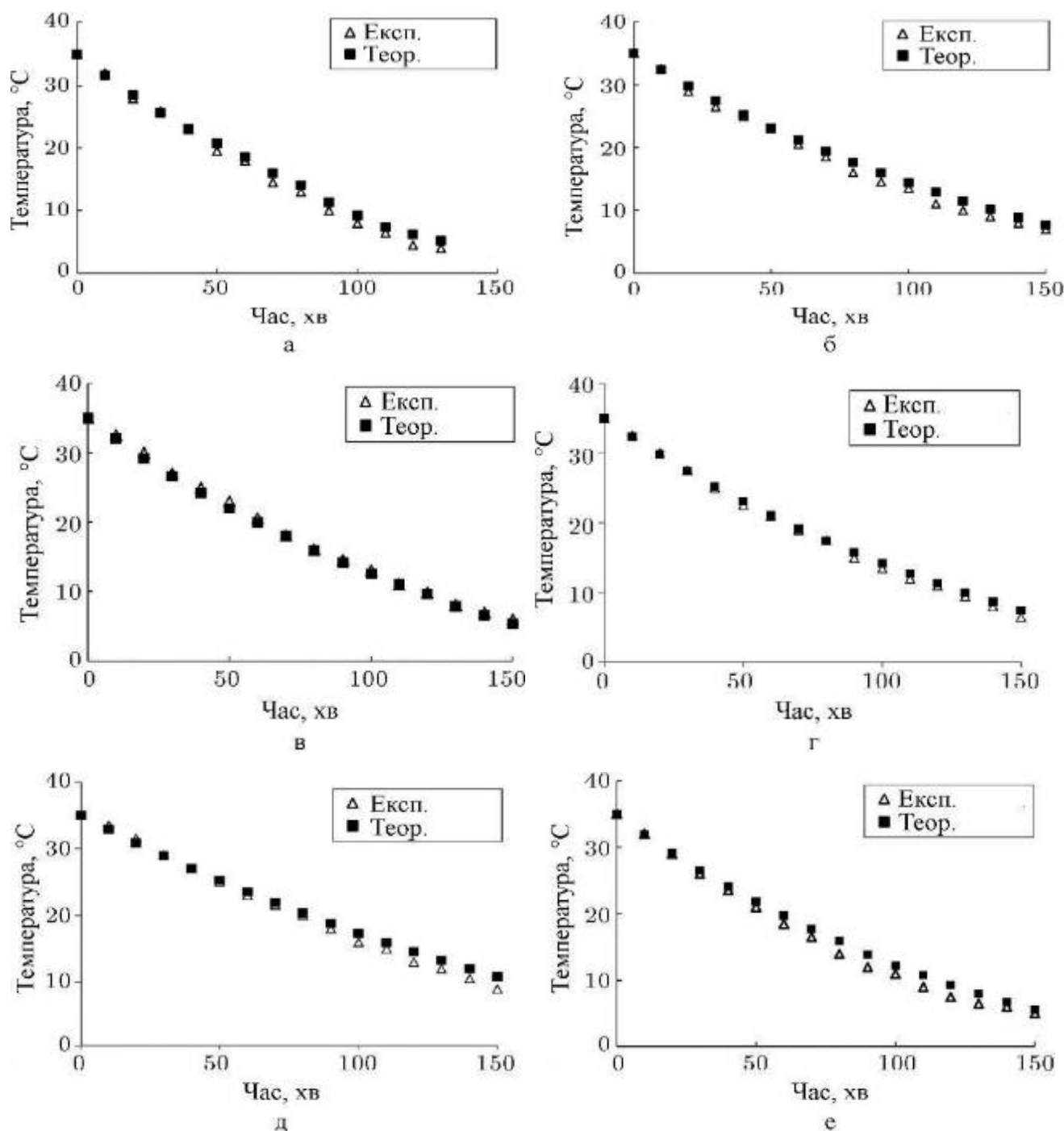


Рисунок 2.3 – Експериментальні та теоретичні криві охолодження для горизонтальних ємностей: а – 2000 л, б – 2500 л, в – 3000 л, г – 4000 л, д – 5000 л, е – 6000 л

На рисунках 2.6 і 2.7 показані залежності загальних коефіцієнтів теплопередачі від температури продукту для вертикальних та горизонтальних ємностей відповідно.

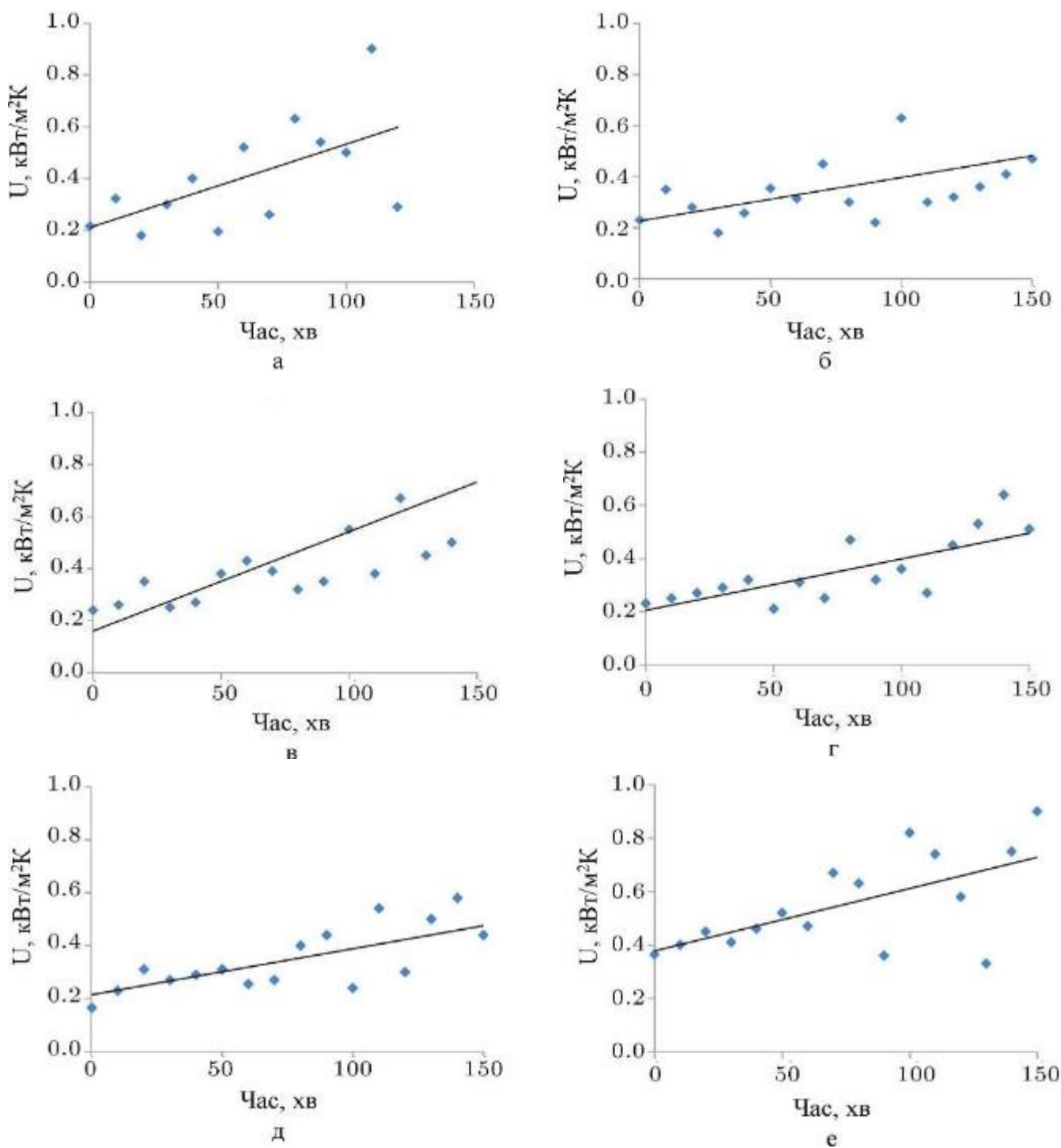


Рисунок 2.4 – Коефіцієнти теплопередачі залежно від часу для вертикальних ємностей: а – 300 л, б – 500 л, в – 1000 л, г – 1500 л, д – 1850 л, е – 2000 л

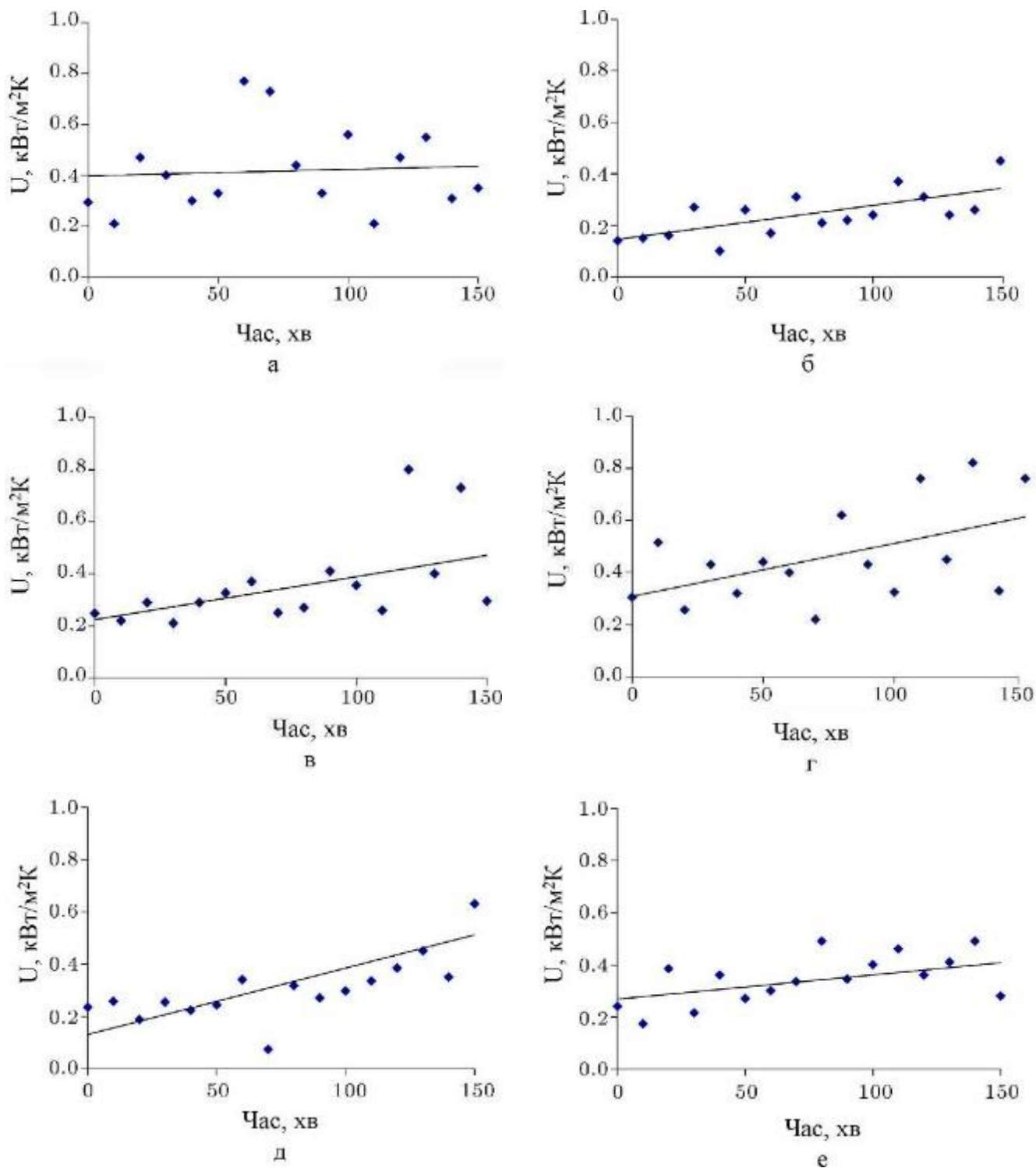


Рисунок 2.5 – Коефіцієнти теплопередачі залежно від часу для горизонтальних ємностей:

а – 2000 л, б – 2500 л, в – 3000 л, г – 4000 л, д – 5000 л, е – 6000 л

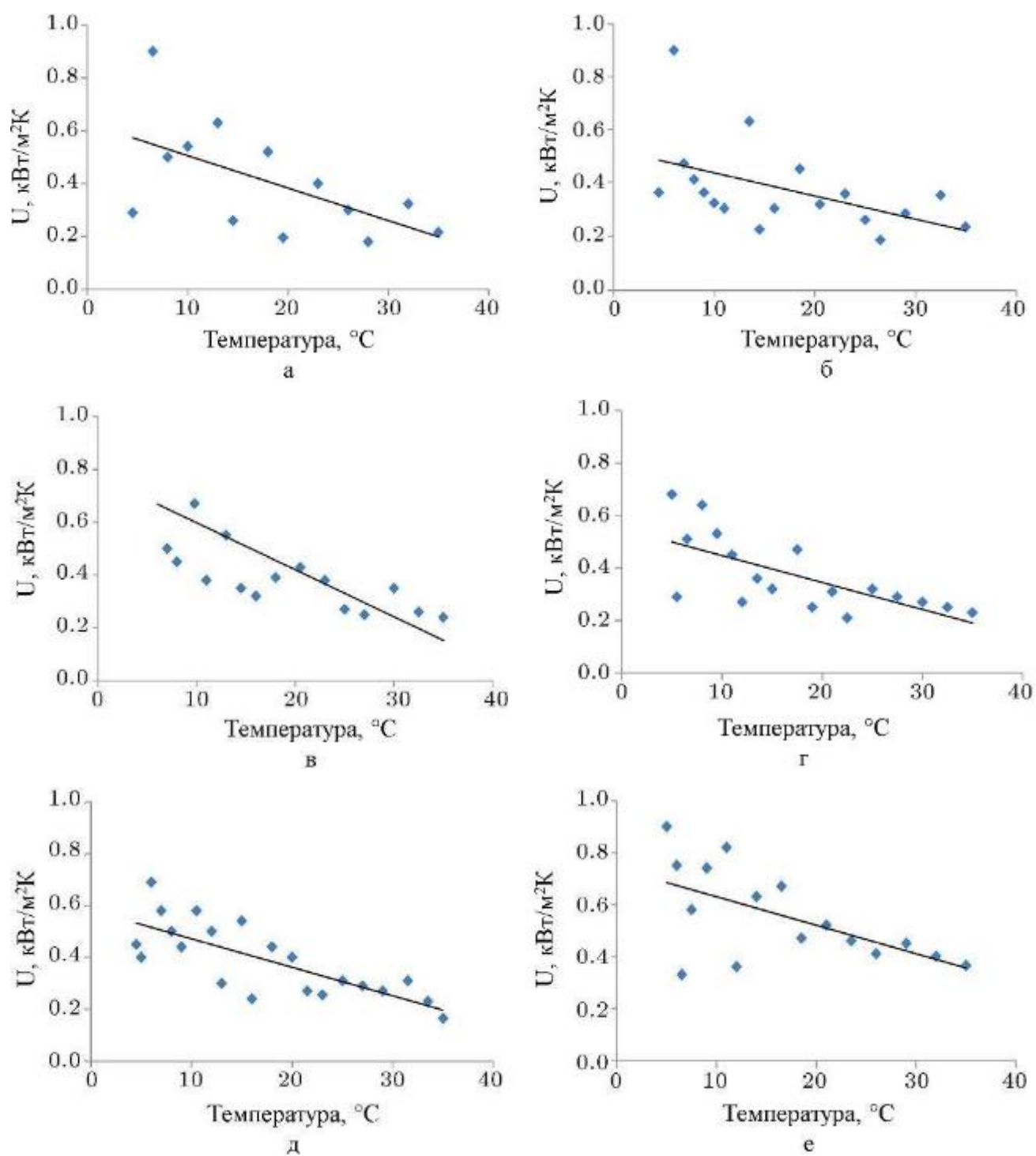


Рисунок 2.6 – Коефіцієнти теплопередачі залежно від температури продукту для вертикальних ємностей: а – 300 л, б – 500 л, в – 1000 л, г – 1500 л, д – 1850 л, е – 2000 л

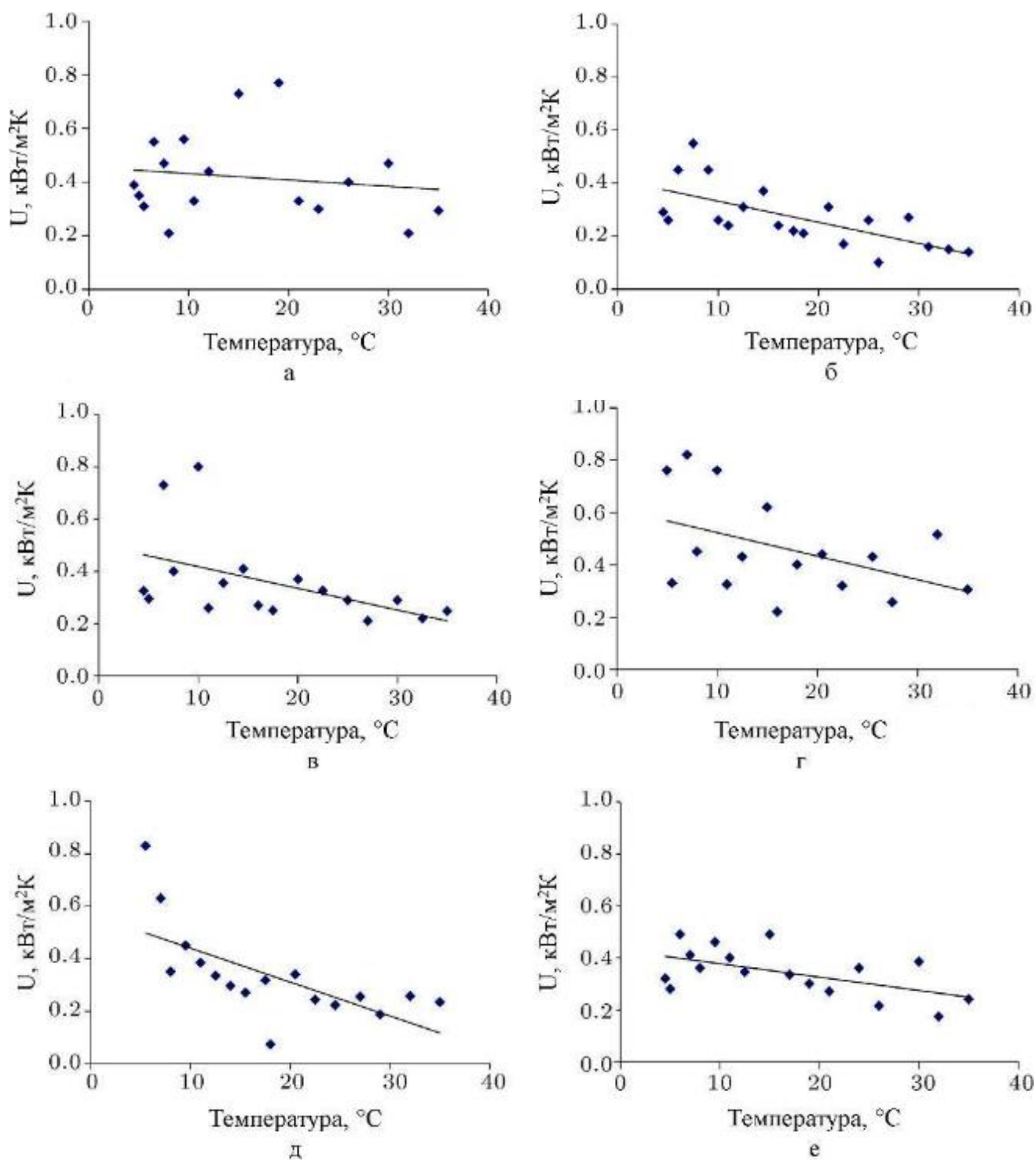


Рисунок 2.7 – Коефіцієнти теплопередачі залежно від температури продукту для горизонтальних ємностей: а – 2000 л, б – 2500 л, в – 3000 л, г – 4000 л, д – 5000 л, та е – 6000 л

Приблизне значення загального коефіцієнта теплопередачі для вертикальних ємностей, отримане експериментально, становить близько $0,3 \text{ кВт/м}^2\cdot\text{К}$. Було встановлено, що значення загального коефіцієнта теплопередачі в горизонтальних ємностях змінюється в діапазоні від $0,2$ до $0,4 \text{ кВт/м}^2\cdot\text{К}$ залежно від місткості, що можна побачити на рисунках 2.8 і 2.9. Рисунки 2.4 та 2.5 показують загальні коефіцієнти теплопередачі залежно від часу для вертикальних і горизонтальних ємностей відповідно. Рисунки 2.6 та 2.7 показують загальні коефіцієнти теплопередачі залежно від температури продукту для вертикальних і горизонтальних ємностей відповідно.

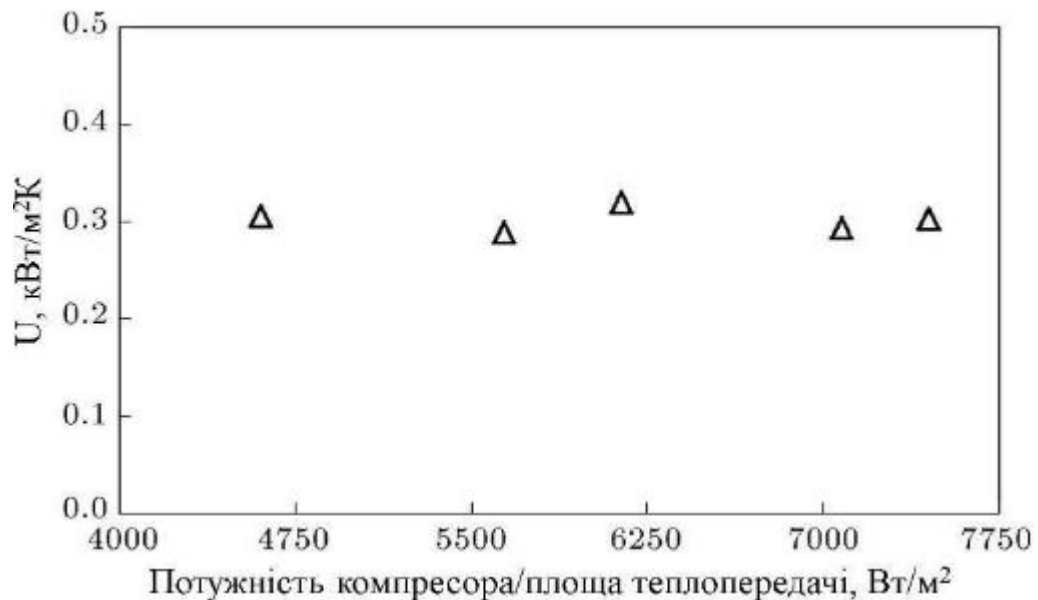


Рисунок 2.8 – Коефіцієнти теплопередачі залежно від потужності компресора/площі теплопередачі для вертикальних ємностей

Потужність компресора на площу теплопередачі, або, іншими словами, інтенсивність потужності, має перевищувати 4000 Вт/м^2 для охолодження молока за менш ніж 3,5 години і запобігання замерзанню молока. З іншого боку, вона повинна бути меншою за 8000 Вт/м^2 , щоб уникнути відокремлення масла. Цю

ситуацію можна контролювати в діапазоні швидкості перемішування від 30 до 60 об/хв.

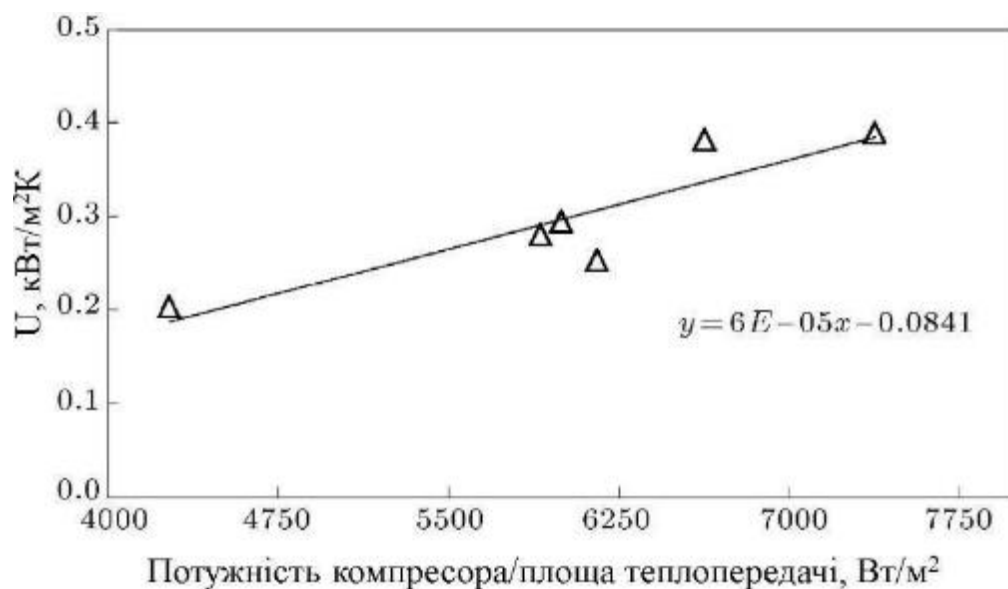


Рисунок 2.9 – Коефіцієнти теплопередачі залежно від потужності компресора/площі теплопередачі для горизонтальних ємностей

На рисунку 2.10 можна побачити залежність об'єму від інтенсивності потужності для як горизонтальних, так і вертикальних ємностей.

Для вертикальних ємностей охолодження здійснювалося лише з нижньої плоскої поверхні. За отриманими результатами було встановлено, що значення загального коефіцієнта теплопередачі не змінюється зі зміною місткості вертикальних ємностей.

Було необхідно запобігти замерзанню молока. Іншими словами, потрібно було забезпечити низьке співвідношення потужності до площі. Для горизонтальних циліндричних ємностей була необхідна більша площа теплопередачі, оскільки вони мали нижчі значення загального коефіцієнта теплопередачі. Це призводило до збільшення витрат і проблеми з розміщенням,

залежно від висоти ємності. Проте, хоча вертикальні ємності були більш ефективними щодо інтенсивності потужності, горизонтальні ємності вважалися більш зручними через проблеми із забрудненням і розміщенням.

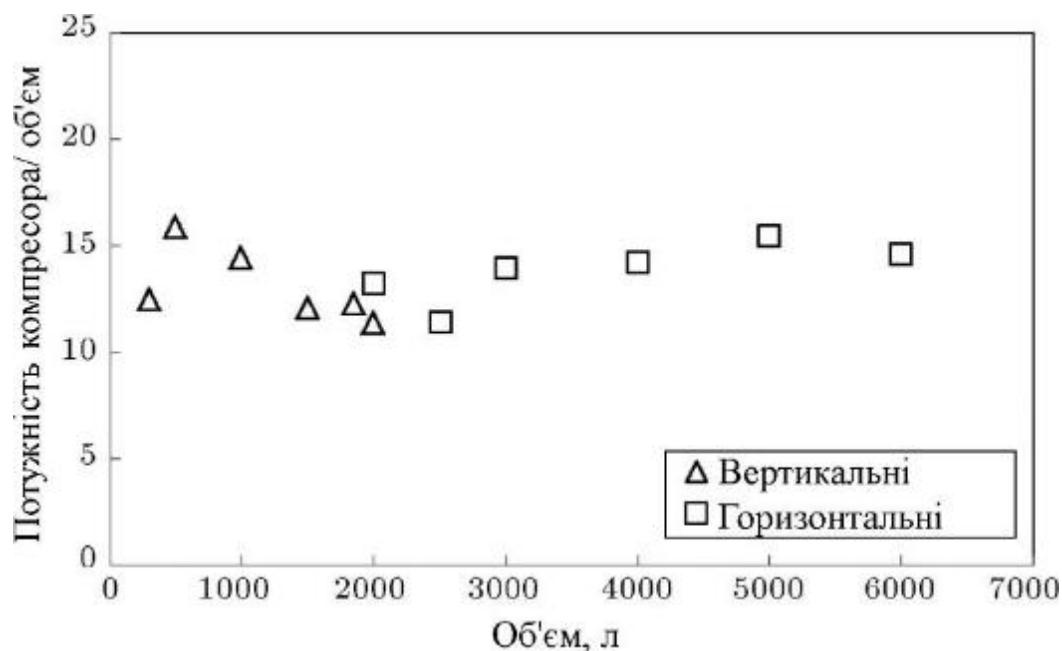


Рисунок 2.10 – Об'єм залежно від потужності компресора/площі теплопередачі для вертикальних та горизонтальних ємностей.

Було виявлено, що ефективність охолодження вертикальних моделей була вищою порівняно з горизонтальними для заданого об'єму молока. Іншими словами, швидкість теплопередачі була більш ефективною у вертикальних ємностях для охолодження молока. У результаті цього дослідження встановлено, що загальний коефіцієнт теплопередачі вертикальних ємностей, який становить приблизно $0,3 \text{ кВт/м}^2 \cdot \text{К}$, можна використовувати незалежно від місткості ємності. У горизонтальних ємностях цей показник варіюється від $0,2$ до $0,4 \text{ кВт/м}^2 \cdot \text{К}$ залежно від місткості.

2.4 Висновки з розділу

1. Дослідження було спрямоване на визначення загальних коефіцієнтів теплопередачі ємностей для охолодження молока різних типів і місткостей. Загальний коефіцієнт теплопередачі горизонтальних циліндричних ємностей був функцією інтенсивності потужності, або, іншими словами, співвідношення потужності компресора до площі поверхні теплопередачі. Крім того, на теплопередачу впливала геометрична форма маломістких горизонтальних ємностей. Тому розробка ємності для охолодження була ускладненою без знання загальних коефіцієнтів теплопередачі.

2. Для вертикальних ємностей охолодження здійснювалося лише з нижньої плоскої поверхні. За отриманими результатами було встановлено, що значення загального коефіцієнта теплопередачі не змінювалося зі зміною місткості вертикальних ємностей. У результаті дослідження встановлено, що загальний коефіцієнт теплопередачі вертикальних ємностей, який становить приблизно $0,3 \text{ кВт/м}^2 \cdot \text{К}$, можна використовувати незалежно від місткості ємності. У горизонтальних ємностях цей показник варіюється від $0,2$ до $0,4 \text{ кВт/м}^2 \cdot \text{К}$ залежно від місткості.

3. Було необхідно запобігти замерзанню молока, тобто забезпечити низьке співвідношення потужності до площі. Для горизонтальних циліндричних ємностей потрібна була більша площа теплопередачі, оскільки вони мали нижчі значення загального коефіцієнта теплопередачі. Це призводило до збільшення витрат і труднощів із розміщенням залежно від висоти ємності. Тим не менш, хоча вертикальні ємності були ефективнішими за інтенсивністю потужності, горизонтальні ємності вважалися більш зручними через проблеми із забрудненням і розміщенням.

3 ЧИСЕЛЬНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ОХОЛОДЖУВАЧА МОЛОКА

3.1 Постановка задачі

Обчислювальна модель є уявленням реальної проблеми або системи, і при використанні моделі можна аналізувати альтернативи рішень, перш ніж обрати певний план для реалізації в реальній системі. За допомогою моделі можна запропонувати покращення, протестувати альтернативи та оптимізувати їх, щоб передбачити найкращий підхід без проведення фізичних експериментів. Обчислювальні моделі використовуються для аналізу теплопередачі в широкому діапазоні застосування.

Зі значним збільшенням обчислювальної потужності метод кінцевих елементів (FEM) був розроблений і широко використовується завдяки високій надійності та точності результатів. FEM широко застосовується для термічного аналізу систем.

Це дослідження було проведено, оскільки чисельне моделювання ніколи не застосовувалося до процесів у молочній промисловості в подібних дослідженнях. Таким чином, метою цього дослідження є моделювання бака для охолодження молока та порівняння даних симуляції з експериментальними результатами.

3.2 Фізико-математичний апарат

Приймаємо максимальну ємність резервуара – 1650 л, висота – 96 см, а діаметр основи – 152 см. Матеріал покриття – нержавіюча сталь, з внутрішнім і зовнішнім шарами, між якими знаходиться (2 см завтовшки) спінений полістирол.

Резервуар охолоджує молоко через систему теплообміну, де хлордифторметан (відомий також як R22) циркулює між дном резервуара (тепловіддача) і зовнішнім середовищем (охолодження), відновлюючи цикл.

Гомогенізацію температури забезпечує прямокутний однолопатевий робочий орган (висотою 10 см і довжиною 60 см). Обертаючись з постійною швидкістю 2,07 м/с, лопать з нержавіючої сталі знаходиться на висоті 10 см від дна резервуара, закріплена на штанзі, вертикально прикріплений до кришки резервуара. У моделюванні вертикальна штанга була проігнорована.

На рисунку 3.1 зображена одна з геометрій, використаних для моделювання молока в загальному резервуарі, із зазначенням об'єму молока та лопатей мішалки.

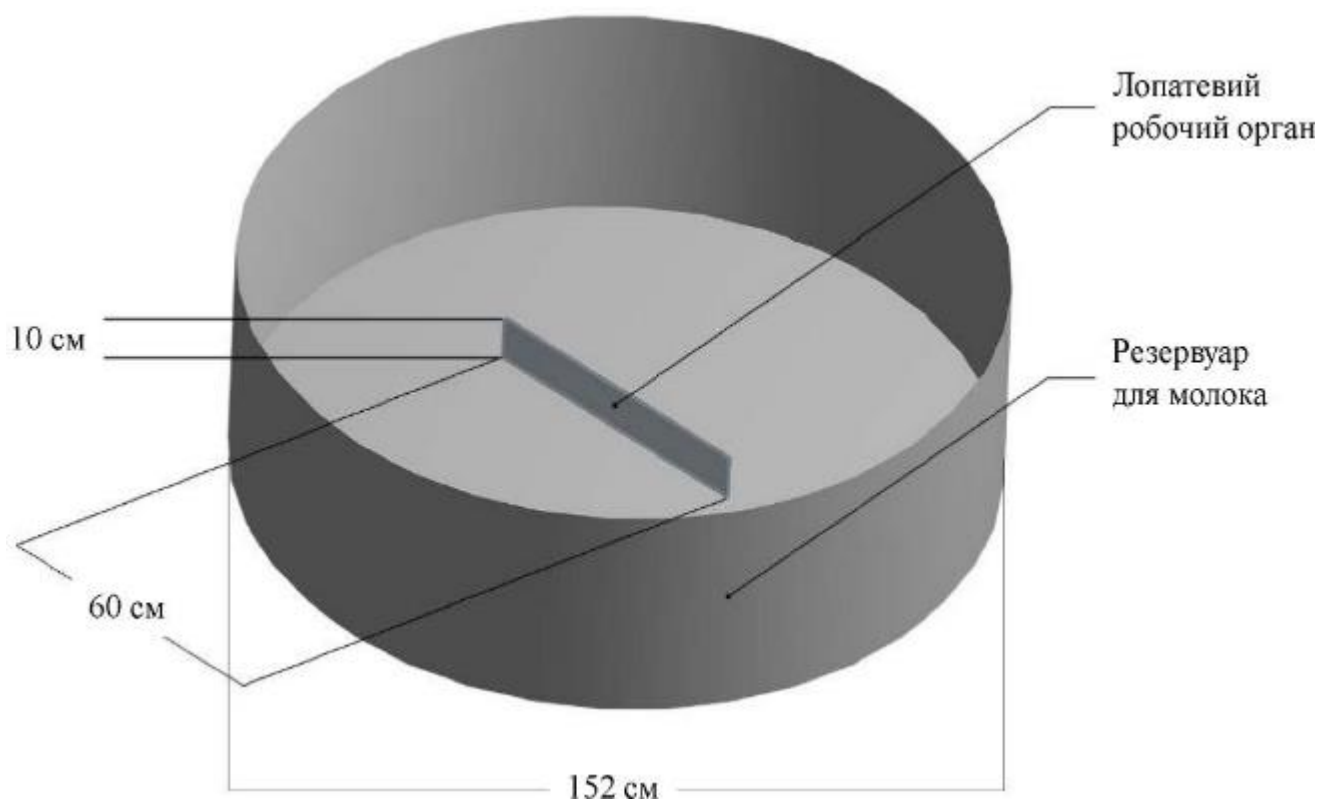


Рисунок 3.1 – Геометрія, використана для представлення молока в резервуарі та лопатевого робочого органа (циліндр представляє об'єм молока, діаметр якого становить 152 см, а висота змінюється залежно від об'єму молока: 16,8 см для 305 л, 0,303 м для 550 л і 0,427 м для 775 л)

Температура молока всередині резервуара вимірювалася за допомогою внутрішньої системи моніторингу температури резервуара, що складається з датчика, розташованого на 10 см вище від дна резервуара на боковій стінці. Теплові потоки, оцінені при охолодженні певних об'ємів молока в різні дні, обчислювалися за допомогою рівняння:

$$\varphi = \frac{Q}{s \cdot A} \quad (3.1)$$

де φ – тепловий потік ($\text{Дж} \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{м}^{-2}$); Q – кількість тепла (Дж); s – час (у секундах); A – площа контакту між молоком і дном резервуара (м^2).

Розроблена і використана обчислювальна модель для моделювання процесу охолодження молока передбачає такі робочі гіпотези: нестационарний стан (як динамічна система в часі), тривимірний потік і ізотермічна система. Як крайова умова, для меж із твердими поверхнями була прийнята умова непроникності.

Рівняння збереження імпульсу, яке використовувала модель, наведене нижче:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \vec{v}) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} \vec{v}) = -\nabla p + \nabla \cdot (\vec{\tau}) + \rho \vec{g} \quad (3.2)$$

де ρ – густина; p – статичний тиск; τ – тензор напружень; g – сила тяжіння.

Для прогнозування турбулентності всередині системи під час моделювання використовувалася k - ϵ -модель, наведена в рівнянні:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\frac{\mu_t}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + 2\mu_t E_{ij} E_{ij} - \rho \epsilon \quad (3.3)$$

де ρ – густина; k – турбулентна кінетична енергія; u_i – компонента швидкості у відповідному напрямку; E_{ij} – компонента швидкості деформації; μ_t – представляє турбулентну в'язкість, де

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\epsilon} \quad (3.4)$$

Дисипація енергії всередині системи охолодження визначається за допомогою рівняння:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho\varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} 2\mu_t E_{ij} E_{ij} - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (3.5)$$

де u_i – компонента швидкості у відповідному напрямку; E_{ij} – компонента швидкості деформації; μ_t – турбулентна в'язкість; і наступні значення є константами: $C_{1\varepsilon} = 0,09$; $\sigma_k = 1$; $\sigma_\varepsilon = 1,30$; $C_{1\varepsilon} = 1,44$; $C_{2\varepsilon} = 1,92$.

Енергія, яку визначає модель, задається рівнянням:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho E) + \nabla \cdot (\vec{v}(\rho E + p)) = \nabla \cdot (k_{\text{eff}} \nabla T) + S_h \quad (3.6)$$

де E – енергія; T – температура; k_{eff} – ефективна теплопровідність; Q – джерело тепла.

3.3 Сіткова і фізична модель

Комп'ютерні симуляції виконувалися за допомогою програмного забезпечення Simcenter Star-CCM+. Резервуар вважався термічно ізольованим на бокових та нижніх стінках. Для моделювання системи у симуляціях розглядали лише об'єм молока, тобто циліндричний об'єм діаметром 152 см і змінною висотою, розрахованою на основі об'єму в даній ситуації.

Сітки геометрій, використані для кожного об'єму молока, змодельованого в цьому дослідженні, мають тетрадральні елементи і показані нижче на рисунку 3.2.

У таблиці 3.1 наведено кількість вузлів і елементів для сіток трьох об'ємів молока, протестованих у цьому дослідженні.

Фізичні властивості, що враховуються при моделюванні системи, наведені в таблиці 3.2.

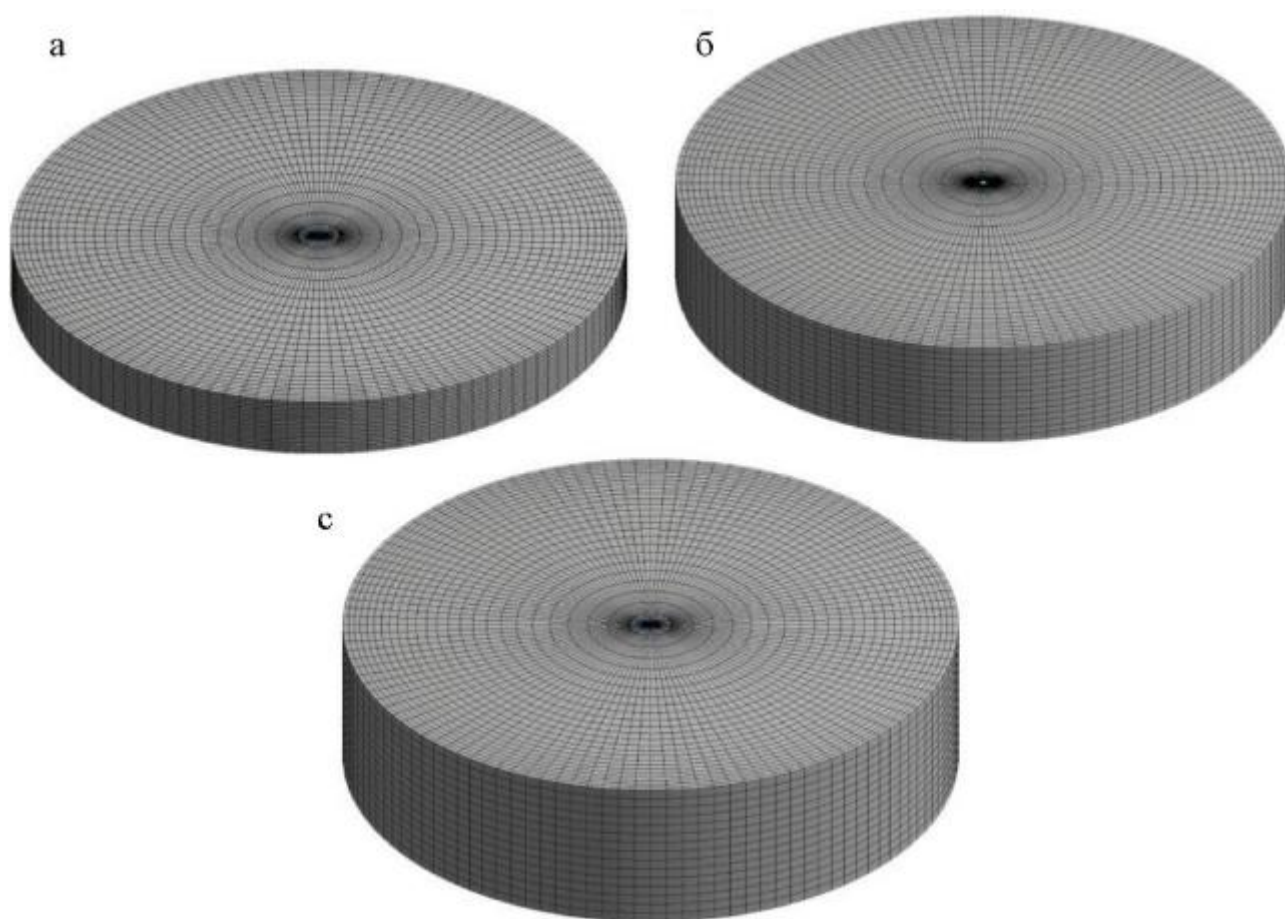


Рисунок 3.2 – Сітки, що використовувалися: (а) 305 л; (б) 550 л; (с) 775 л

Таблиця 3.1 – Кількість вузлів та елементів сіток для трьох об'ємів молока, протестованих у цьому дослідженні (305, 550 та 775 літрів)

Об'єм (літри)	Вузли	Елементи
305	54976	48555
550	57136	50175
775	58816	51435

Для фізичних моделей у зонах молока (рідина) обираються такі параметри: тривимірна, нестационарна неявна, багатофазна суміш, багатофазна взаємодія, об'єм рідини VOF, роздільна течія, градієнти, турбулентна, осереднення по Рейнольдсу, модель турбулентності K-Epsilon, допустима двошарова K-Epsilon, дистанція стінки, двошарова для всіх y^+ та роздільна багатофазна температура.

Ейлерівські фази задані як повітря і молоко. Для повітря обрані моделі: газ, ідеальний газ, турбулентна та енергія. Для вологи вибрані моделі: рідина, постійна щільність, турбулентна та енергія.

Таблиця 3.2 – Фізичні властивості молока та нержавіючої сталі, що враховуються в моделюванні

Матеріал	Густина ($\text{кг}\times\text{м}^{-3}$)	Специфічна теплоємність ($\text{Дж}\times\text{кг}^{-1}\times\text{°C}^{-1}$)	Теплопровідність ($\text{Вт}\times\text{м}^{-1}\times\text{°C}^{-1}$)	В'язкість ($\text{кг}\times\text{м}^{-1}\times\text{с}^{-1}$)
Молоко	1032	3890	0.53	0.002
Нержавіюча сталь	7955	510	15.5	-

3.4 Результати чисельного моделювання

У таблиці 3.3 наведені результати спостережень за обсягом молока в баку, початковими та кінцевими температурами, загальним часом і тепловим потоком на дні бака під час охолодження.

На рисунках 3.3–3.5 показано розподіл температури в баку через 1800 секунд (30 хвилин) після початку симуляції для обсягів 305 л, 550 л та 775 л відповідно.

Таблиця 3.3 – Спостереження за різними обсягами молока в баку в різні дні

Спостереження	Обсяг (м^3)	Температура (°C)		Час (хв)	Тепловий потік ϕ ($\text{Вт}/\text{м}^2$)
		Початкова	Кінцева		
1	0,305	22,1	4,0	66,29	-3095,28
2	0,550	23,2	4,0	92,35	-4250,60
3	0,775	23,6	4,0	169,30	-3335,06

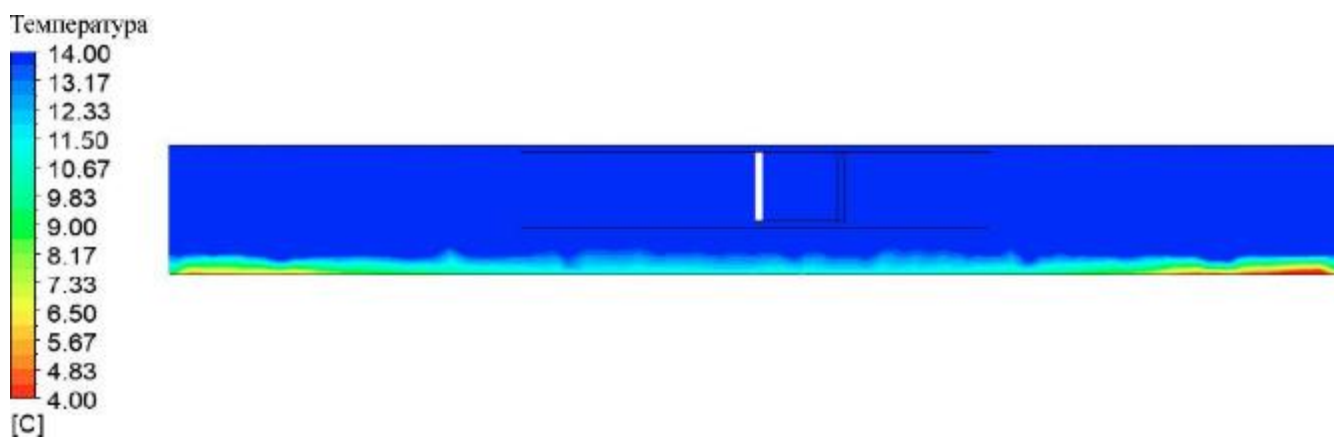


Рисунок 3.3 – Перетин розподілу температури всередині бака для об'єму 305 л після 30 хвилин моделювання

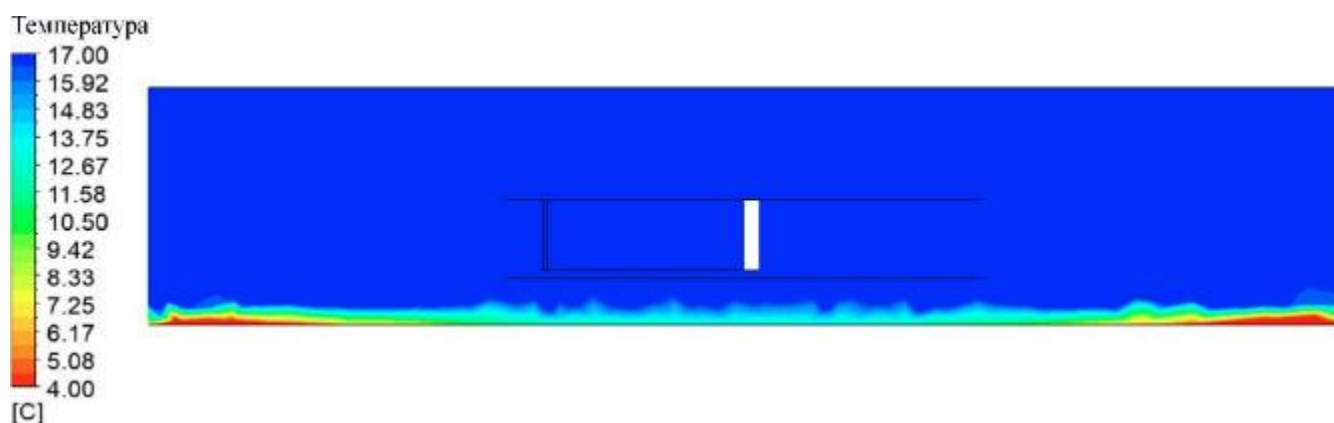


Рисунок 3.4 – Перетин розподілу температури всередині бака для об'єму 550 л після 30 хвилин моделювання

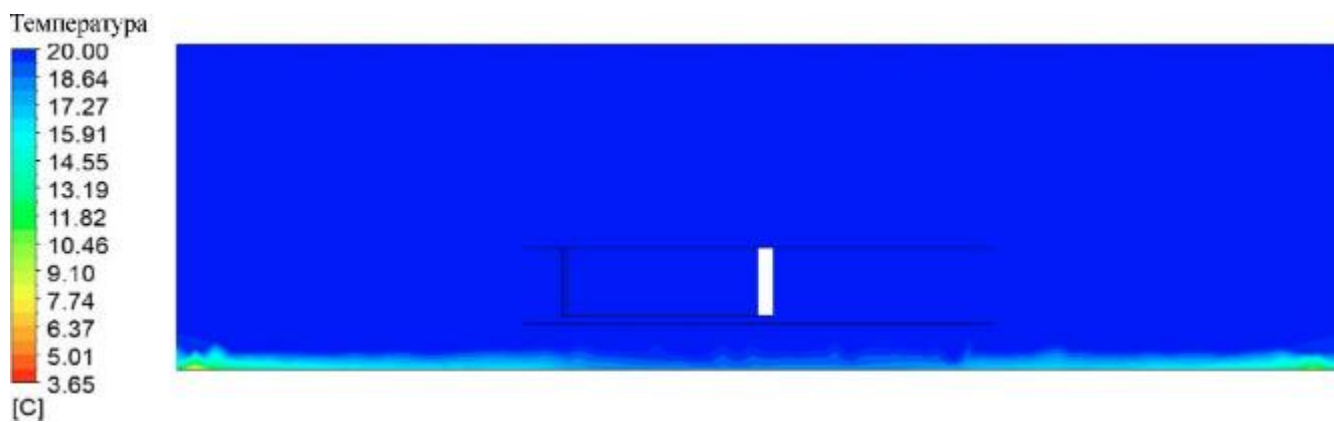


Рисунок 3.5 – Перетин розподілу температури всередині бака для об'єму 775 л після 30 хвилин моделювання

Зміна середньої температури залежно від часу також була відображена (рисунок 3.6), використовуючи значення, отримані для кожного об'єму (0,305 м³, 0,550 м³ та 0,775 м³). Таблиця 3.4 містить інформацію про час, необхідний для охолодження молока до 4 °С в реальній системі, та час, необхідний для охолодження молока до 4 °С за допомогою моделювання. Абсолютна відносна помилка була розрахована для спостереження кожного з модульованих об'ємів молока, використовуючи рівняння

$$\text{Erro} = \left| \frac{\text{simulation time} - \text{real time}}{\text{real time}} \right| \quad (3.7)$$

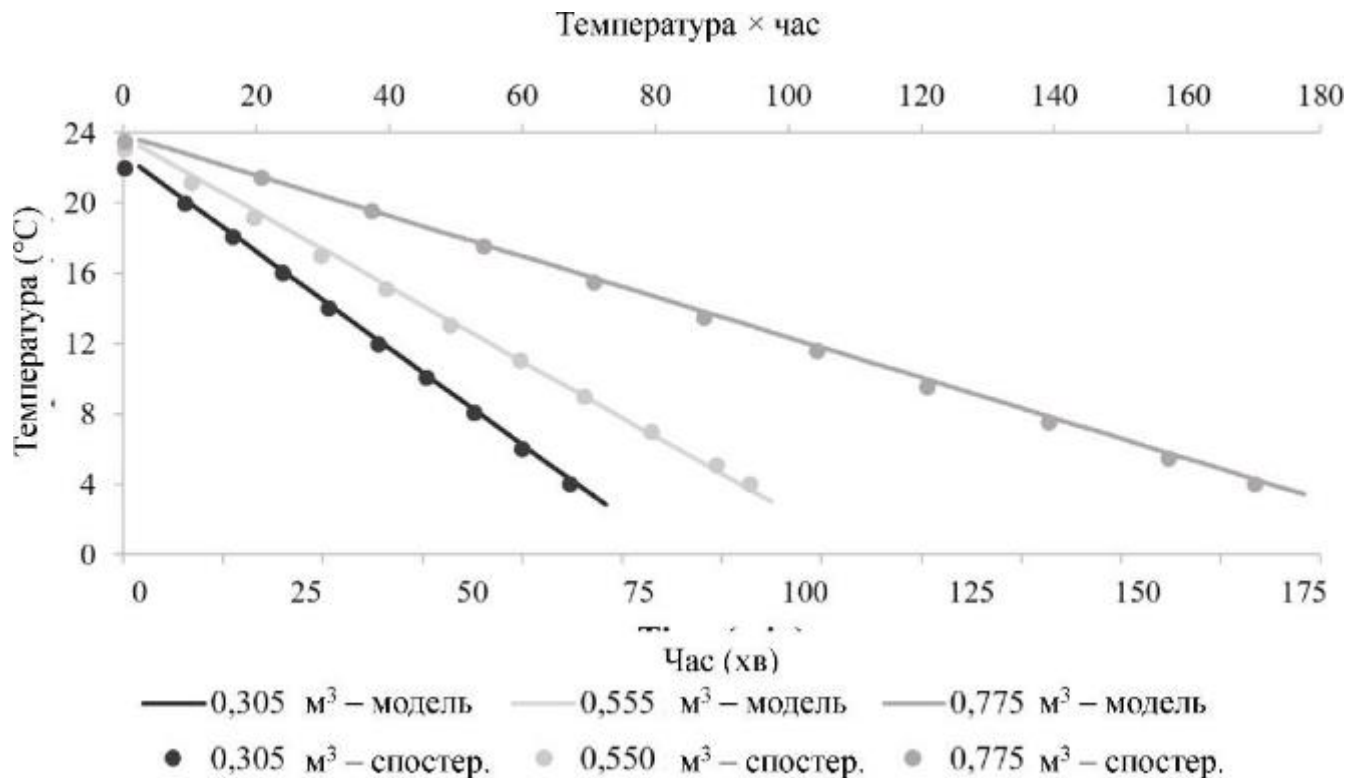


Рисунок 3.6 – Середня температура (°C) як функція часу для різних обсягів молока

Середня абсолютна помилка, розрахована для трьох симульованих об'ємів молока, становила 1,20 %. Відхилення до 10 % між реальними значеннями та значеннями, визначеними за допомогою комп'ютерного моделювання, вважаються

задовільними та вказують на те, що комп'ютерна модель може бути використана для представлення реальної ситуації.

Таким чином, модель, розроблена в цьому дослідженні, працює задовільно та може бути використана для представлення реального охолоджувача молока за певних умов.

3.4 Висновки з розділу

1. Обчислювальна модель, що була розроблена для моделювання процесу охолодження молока в резервуарі, дозволяє ефективно аналізувати та оптимізувати умови охолодження, спрощуючи прийняття рішень перед впровадженням у реальну систему. Використання методу кінцевих елементів (FEM) забезпечує високу точність та надійність результатів, що є критично важливим для молочної промисловості, де чисельне моделювання ще не отримало широкого застосування. Модель враховує різні фізичні параметри та умови, такі як температура, густина та теплопередача, що дозволяє точно прогнозувати поведінку системи в реальному часі. Отримані дані підтверджують, що розроблена модель може стати важливим інструментом для покращення процесів охолодження молока, пропонуючи нові можливості для оптимізації технологічних процесів у галузі.

2. Було побудовано та змодельовано комп'ютерну модель охолоджувача молока, що використовується для охолодження молока до 4 °C протягом 3 годин. Модель була протестована для трьох об'ємів у баку з різними температурами на початку процесу. Середня абсолютна відносна помилка між часом, що минув у реальній ситуації, та еквівалентним часом у симуляції для симульованих об'ємів молока становила 1,20 %.

4 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ УДОСКОНАЛЕНОГО ОХОЛОДЖУВАЧА МОЛОКА НА МОЛОЧНІЙ ФЕРМІ

4.1 Постановка задачі моделювання

Об'ємні охолоджувачі повинні відповідати стандартам охолоджувальної здатності, які включають такі пункти.

1. Коли молоко збирається щодня, стандарти охолоджувальної здатності такі:

– об'ємні охолоджувачі молока розраховані на щоденний забір і повинні охолоджувати 50 % (перше завантаження) об'єму бака з 32 °С (середня температура, при якій молоко надходить у бак) до ≤ 10 °С протягом однієї години, і до ≤ 4 °С протягом другої години з моменту зберігання молока;

– коли додається додаткове тепле молоко (друге завантаження та повний бак), змішана температура теплового та холодного молока не повинна перевищувати 10 °С.

2. Коли молоко збирається через день, стандарти охолоджувальної здатності об'ємних охолоджувачів молока такі:

– охолоджувачі повинні охолоджувати 25 % (перше завантаження) об'єму бака з 32 °С (середня температура, при якій молоко надходить у бак) до ≤ 10 °С протягом однієї години, і до ≤ 4 °С протягом другої години з моменту зберігання молока.

Теплоємність цільного молока значно варіює залежно від температури. Зазвичай цей показник становить від 3,894 до 3,940 кДж/кг·°С. Найвища теплоємність спостерігається при 19,4 °С і різко знижується вище та нижче цієї точки. Середнє значення можна взяти за 3,940 кДж/кг·°С. Густина цільного молока також варіює залежно від його складу і зазвичай становить від 1,028 до 1,035. Густина значно змінюється з температурою, тому на практиці всі виміри

мають проводитись при певній температурі, зазвичай 15,5 °С, або слід вносити корекцію. Середнє значення можна взяти за 1,032.

Це дослідження було проведено для оцінки ефективності об'ємного охолоджувача молока на молочній фермі за умов різної завантажувальної здатності молока (щоденний і кожен другий день збір). Специфічні цілі були поставлені наступним чином:

- відрізнити поведінку щоденного та кожного другого дня збору, підтримуючи температуру молока в об'ємному охолоджувачі;
- оцінити застосовність об'ємного охолоджувача відповідно до стандартів охолоджувальної здатності;
- розрахувати охолоджувальну здатність об'ємного охолоджувача при різних рівнях завантаження;
- експериментально оцінити оптимальний обсяг молока в об'ємному охолоджувачі.

4.2 Методика досліджень

Експериментальний блок було протестовано та відкалібровано відповідно до стандартів охолоджувальної потужності при різних об'ємах завантаження молока. Експериментальна робота головним чином була спрямована на дослідження впливу об'єму молока в охолоджувальному баку, температури та потужності охолодження молока для експериментів зі збором молока щодня та через день.

Охолоджувач молока був розміщений у спеціальному приміщенні для молока, яке знаходилося поруч із електронною системою доїння, де молоко охолоджувалося після доїння. В електронній доїльній установці було чотири доїльні блоки. Після завершення процесу доїння молоко надходило з доїльної установка до молокозбирача, переміщуючись у вигляді послідовних порцій за допомогою спеціального насоса та системи трубопроводів. Охолоджувач молока

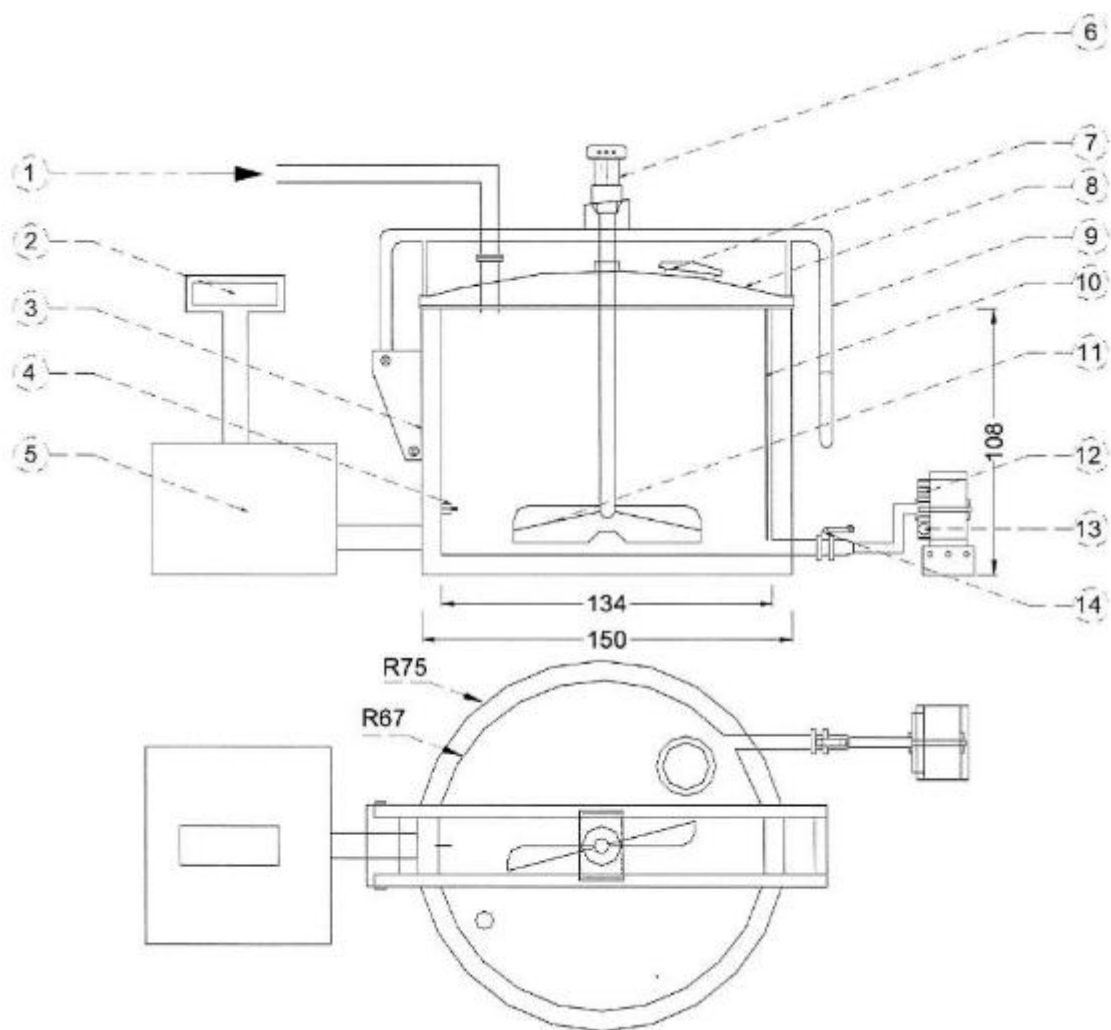
складався з трьох основних компонентів: бака для охолодження молока, холодильного блоку та насоса для вивантаження молока. Внутрішня, зовнішня поверхні та кришка бака були виготовлені з нержавіючої сталі. Щоб уникнути тепловтрат через бак, між внутрішньою і зовнішньою поверхнями був розміщений ізоляційний матеріал. Бак було оснащено змішувачем для підтримання фізичних характеристик молока під час охолодження. Також бак мав об'ємний лічильник для вимірювання об'єму молока в літрах. Крім того, була спеціальна система для контролю та вимірювання температури молока у градусах Цельсія. Ця система містила термостат і цифровий термометр (модель: WSTE92). Холодильний блок мав систему прямого охолодження для бака молока. При прямому охолодженні випарник встановлювався на дні та частково по боках бака, що дозволяло молоку безпосередньо контактувати з випарником і створювало прямий теплоперенос від молока до холодного джерела. Насос для вивантаження молока мав єдину функцію – доставляти молоко з охолоджувача молока до транспортного засобу для його подальшого маркетингу. Технічні характеристики охолоджувача молока наведено в таблиці 4.1. Його геометричне креслення зображено на рис. 4.1.

Таблиця 4.1 – Технічні характеристики використаного охолоджувача молока

Показники	Модель і значення
Тип	Пряме охолодження (DX/OC)
Ємність охолоджувального бака	1600 літрів (1.6 м ³)
Тип конденсаційного блоку	PRB/1/H8/521A
Холодоагент	R404
Маса холодоагенту	2.5 кг
Електричний вхід	200 кВт-3ф (400В-50Гц)

Тести були поділені на дві основні групи експериментів: перша група стосувалася дослідження поведінки охолоджувача молока при зборі молока щодня та зборі молока через день. Експерименти щоденного збору молока було класифіковано на дві різні місткості завантаження. Перше завантаження

охолоджувача молока було здійснене при заповненні його на 50 % від місткості. Друге завантаження виконувалося при заповненні бака на 100 % (повний бак). Друга група експериментів досліджувала охолоджувальну поведінку молока за умов збору молока через день.



- 1 – вхідний канал для молока; 2 – цифровий індикатор температури;
 3 – охолоджувальний бак для молока; 4 – термостат; 5 – холодильний блок;
 6 – двигун; 7 – спостережне віконце; 8 – кришка; 9 – ручка; 10 – шкала ємності;
 11 – змішувач молока; 12 – насос; 13 – вихідний отвір для молока; 14 – ручний клапан

Рисунок 4.1 – Геометричне зображення охолоджувача молока

Аналогічно, експерименти зі збором молока через день поділялися на перше та друге завантаження охолоджувача молока. Охолоджувач молока заповнювався на 25 % та 50 % від його місткості, що відповідало першому та другому завантаженням, відповідно. Отримані результати щоденного збору молока порівнювалися зі стандартами охолоджувальної потужності. Було визначено оптимальну місткість охолоджувача молока. Також було розраховано потужність охолодження охолоджувача молока при різних об'ємах завантаження молока.



Рисунок 4.2 – Загальний вигляд охолоджувача молока

Дослідження включало дві основні системи: щоденний збір та збір молока через день для охолоджувача молока. Техніка охолодження молока здійснювалася таким чином:

1. Вимірювалася температура повітря у приміщенні для молока, і середнє значення становило 31 ± 2 °C.

2. Перед завантаженням молока у охолоджувача молока фіксувалася температура повітря в охолоджувальному баку для експериментів зі щоденним та збором молока через день.

3. Під час першого завантаження молока до охолоджувача молока виконувалися наступні послідовні кроки:

– після надходження першої порції молока до охолоджувача молока, система охолодження автоматично запускалася, а змішувач розпочинав роботу та підтримувався до завершення процесу доїння і охолодження молока до, щонайменше, 4 °С;

– кількість молока відбиралася з електронного доїльного апарата до охолоджувача молока кожні 0,1 години. Об'єм молока становив 0,044 м³ та 0,022 м³ для експериментів зі щоденним збором та збором молока через день відповідно;

– загальна кількість завантажень молока у охолоджувальний бак протягом часу завантаження становила вісімнадцять для заповнення охолоджувача молока до 50 % ємності для щоденного збору молока. Для кожного другого дня охолоджувач молока був заповнений на 25 % його ємності;

– температуру молока вимірювали кожні 0,1 години протягом часу завантаження і зберігання в охолоджувальному баку, тобто від початку завантаження молока в охолоджувач до того моменту, коли молоко знаходилося всередині бака і температура для безпечного зберігання досягала 4 °С.

4. При другому завантаженні молока в охолоджувач були повторені кроки, які виконувалися під час першого завантаження. Але наприкінці завантаження охолоджувач молока був заповнений приблизно на 100 % і 50 % ємності для експериментів зі збору молока щодня і кожного другого дня відповідно.

Вимірювання:

1. Об'єм молока всередині охолоджувача вимірювали за допомогою об'ємного лічильника в літрах, який можна було легко перевести в кубічні метри.

Температуру молока вимірювали за допомогою цифрового термометра, який показував температуру у градусах Цельсія.

2. Для розрахунку відповідного та безпечного об'єму молока всередині охолоджувача під час другого завантаження (100 %) для щоденного збору молока використовували метод арифметичної інтерполяції.

3. Охолоджувальну здатність охолоджувача визначали за наступною формулою:

$$CC = [V \times \rho \times C_p (T_1 - T_2)] / t \quad (4.1)$$

де CC – охолоджувальна здатність охолоджувача, кДж/год; V – об'єм молока всередині охолоджувача, м³; ρ – густина молока (1,032) кг/м³; C_p – питома теплоємність молока (3,940) кДж/кг·°С; T_1 – температура молока у будь-який час завантаження, К; T_2 – температура молока при досягненні безпечної температури зберігання (4 °С) К; t – час охолодження, протягом якого температура молока досягає T_2 , год.

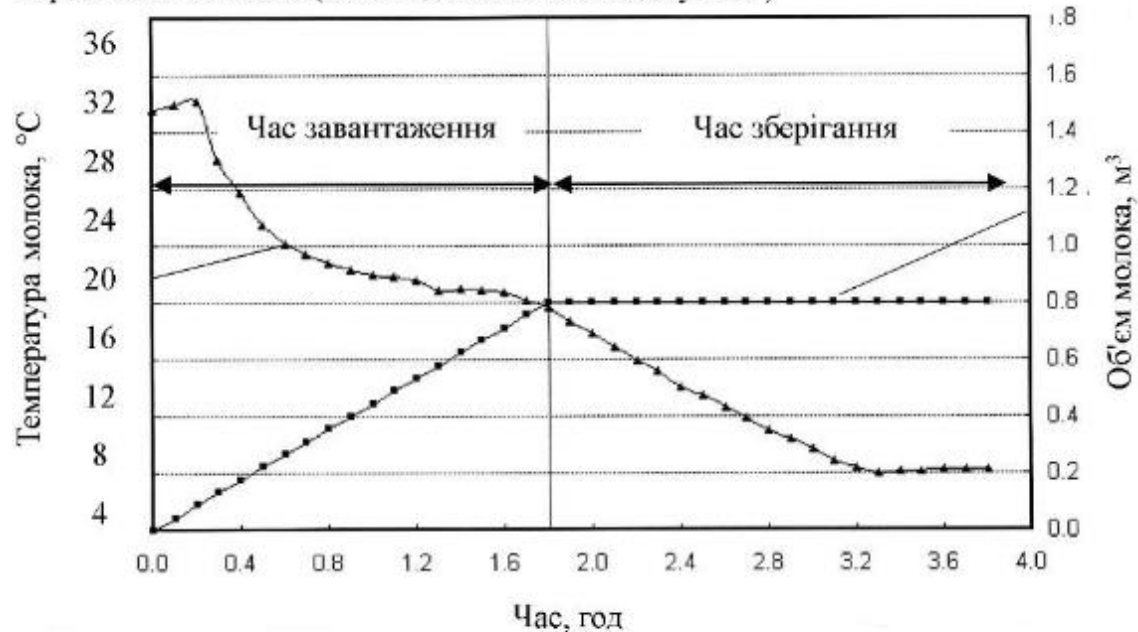
Стосовно статистичних процедур, було проведено множинний регресійний аналіз для представлення даних у лінійній формі. Кожне отримане рівняння було обмежене діапазоном застосування. Відношення між охолоджувальною здатністю охолоджувача як залежною змінною та об'ємом молока, температурою молока та часом завантаження молока як незалежними змінними було розроблене для умов щоденного та через день збору молока.

4.3 Результати досліджень

Експерименти зі збору молока щодня. Під час першого завантаження молока охолоджувач був заповнений на 50 % ємності, як показано на рис. 4.3 і наведено в таблиці 4.2. Об'єм і температура під час завантаження та зберігання наведені на рис.4.3. На початку процесу охолодження молока і перед початком першого

завантаження внутрішня температура охолоджувача була $29,6\text{ }^{\circ}\text{C}$ при нульовому часі.

Перше завантаження (50 % від ємності охолоджувача)



Друге завантаження (100 % від ємності охолоджувача)

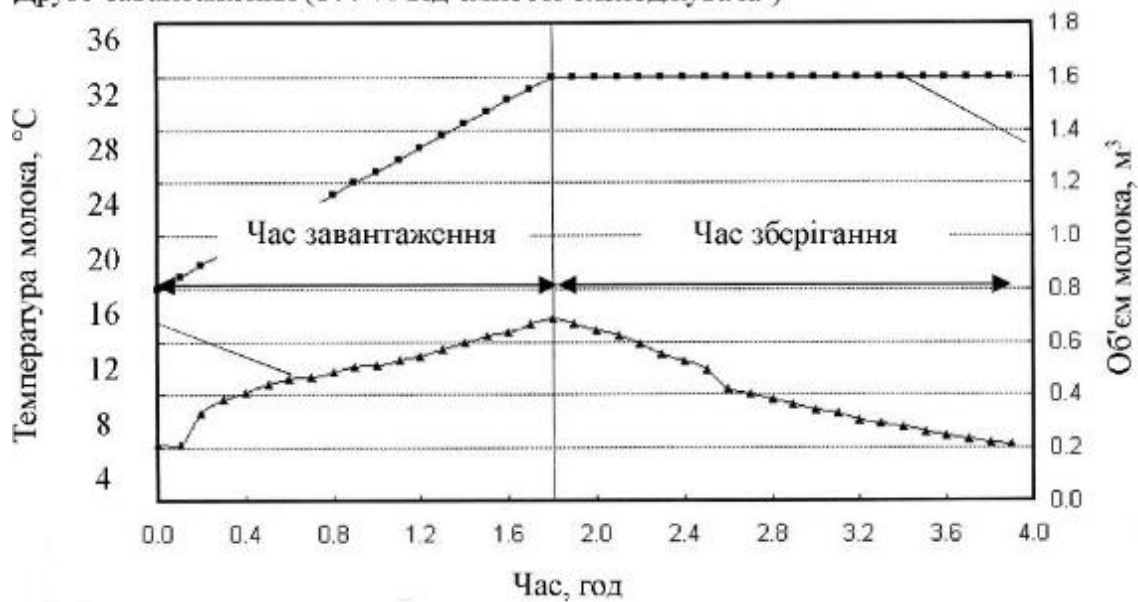


Рисунок 4.3 – Динаміка об'єму молока всередині охолоджувача та відповідної температури з часом завантаження та зберігання для експериментів зі збору молока щодня

Через 0,1 год об'єм молока всередині охолоджувача становив 0,044 м³, а відповідна температура — 29,9 °С. Під час другого завантаження, через 0,2 год, об'єм молока всередині охолоджувача збільшився з 0,044 до 0,088 м³ (на 100 %), а температура піднялася з 29,9 °С до 30,2 °С (на 0,1 %). Невелике підвищення температури молока, ймовірно, сталося тому, що охолоджувач був ще на початковій стадії роботи. Через 1,8 год охолоджувач був заповнений молоком приблизно на 50 % (0,8 м³), а температура становила 15,6 °С. Коли об'єм молока був постійним при 0,8 м³, а через 2,8 год (одна година після завершення завантаження молока) температура молока знизилася з 15,6 °С до 7 °С (на 2,98 %). Отже, ще через годину (через 3,8 год і протягом двох годин після завершення завантаження молока) при постійному об'ємі молока 0,8 м³ температура молока знизилася з 7 °С до 4 °С (на 0,96 %). З наведеного вище обговорення було очевидно, що стандарти охолоджувальної здатності охолоджувача молока для експериментів зі щоденним збором молока та необхідної температури молока було досягнуто успішно за умов щоденного збору під час першого завантаження охолоджувача молока.

Таблиця 4.2 – Технічні характеристики охолоджувача молока, спроектованого для щоденного збору під час першого завантаження (50 % від ємності охолоджувача)

Кількість	Час, год	Об'єм молока, м ³	Температура молока, °С	Стандарти охолодження, °С
1	0,1	0,044	29,6	–
2	0,2	0,088	29,9	–
18	1,8	0,8	15,3	–
–	2,5	0,8	9,2	–
–	2,8	0,8	6,7	≤ 10,0
–	3,2	0,8	4,1	–
–	3,8	0,8	4	≤ 4

Друге завантаження молока для експериментів зі щоденним збором (яке займало приблизно 100 % ємності охолоджувача), зображено на рис. 4.3 і наведено в таблиці 4.3. Прогрес об'єму молока та відповідної температури під час завантаження і зберігання також показаний на рис. 3.3. Перед початком другого завантаження об'єм молока всередині охолоджувача становив 0,8 м³, а температура була 4 °С. Аналогічно, через 0,1 год об'єм молока становив 0,844 м³, а температура залишалася постійною на рівні 4 °С. Через 1,8 год від початку другого завантаження об'єм молока всередині охолоджувача становив приблизно 100 % його ємності (1,6 м³), а температура піднялася до 13,5 °С. Це підвищення температури молока було логічним і нормальним через завантаження свіжого молока в охолоджувач. З вищезазначених результатів було зрозуміло, що ці результати не відповідали стандартам охолоджувальної здатності для експериментів зі щоденним збором молока за умов другого завантаження, і необхідної температури молока (≤ 10 °С) не було досягнуто під час другого завантаження охолоджувача молока. Підвищення температури молока понад 10 °С було пов'язане зі збільшенням об'єму молока всередині охолоджувача до 100 % його ємності. Тому була необхідність провести та запропонувати умови для експериментів зі збором молока кожного другого дня. Водночас об'єм молока всередині охолоджувача слід було зменшити, а відповідну ємність охолоджувача оцінити для відповідності стандартам охолоджувальної здатності для щоденних експериментів зі збору молока.

Експерименти зі збору молока через день. Перше завантаження молока в охолоджувач заповнило його на 25 % від ємності, як показано на рис. 4.4 і наведено в таблиці 4.4. Зміна об'єму молока в охолоджувачі та відповідна температура під час завантаження та зберігання наведені на рис. 4.4. Початкова (до завантаження) температура всередині охолоджувача становила 27 °С. Через 0,1 год після початку завантаження молока об'єм усередині охолоджувача становив 0,022 м³, а температура – 27,4 °С. Через 0,2 год об'єм молока збільшився до 0,044

м³ (на 100 %), а температура підвищилася до 28,5 °С (на 0,37 %). Охолоджувач був ще на початковій стадії роботи (увімкнення), коли сталося це незначне підвищення температури молока.

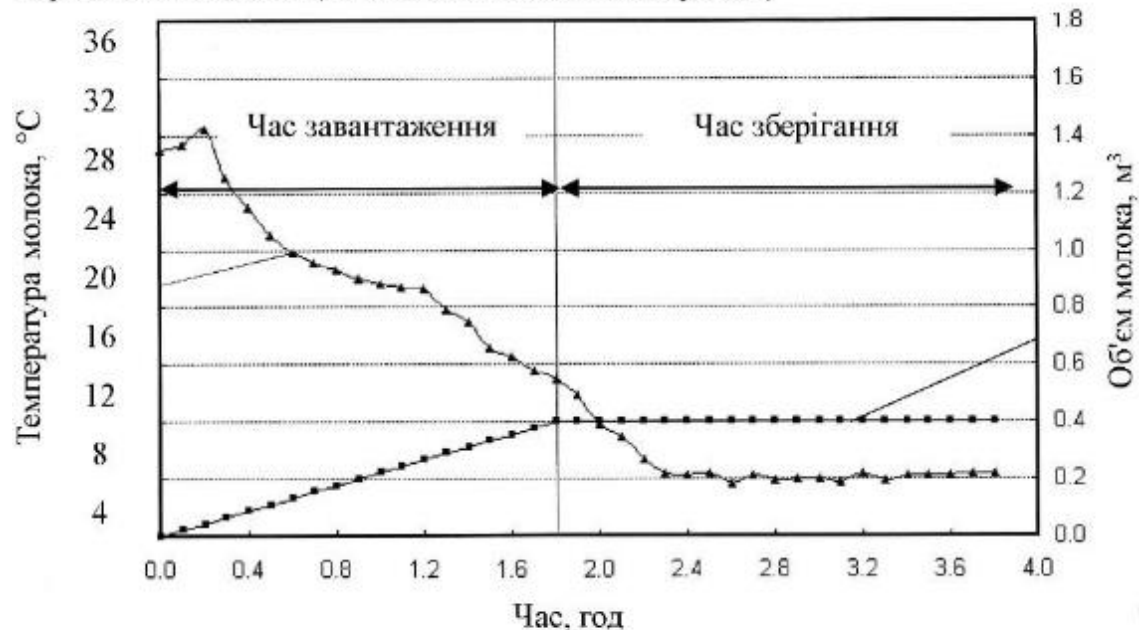
Таблиця 4.3 – Характеристики об'ємного молочного охолоджувача, розробленого для щоденного збору під час другого завантаження молока (100 % від місткості охолоджувача)

Кількість завантажень	Час, год	Об'єм молока, м ³	Температура молока, °С	Стандарти охолодження, °С
1	0,1	0,844	4	–
2	0,2	0,888	6,3	–
18	1,8	1,6	13,5	< 10,0
–	2,8	1,6	7,4	–
–	3,8	1,6	4,1	–

Через 1,8 год від початку завантаження молока (на кінець першого завантаження) об'єм молока становив 0,4 м³ (приблизно 25 % ємності охолоджувача), а температура – 11 °С. При постійному об'ємі молока 0,4 м³ упродовж періоду від 1,8 до 2,8 год (протягом однієї години від початку часу зберігання після завершення завантаження) температура молока знизилася з 28,4 до 3,9 °С (на 2,5 %). У наступну годину (при 3,8 год) (протягом двох годин від початку часу зберігання) без змін в об'ємі молока, температура молока зросла до 4,4 °С. З наведених результатів було очевидно, що необхідна температура молока всередині охолоджувача була успішно досягнута при першому завантаженні, заповнивши його на 25 % ємності молоком. Це підтвердило і, відповідно, задовільнило умови стандартів охолоджувальної здатності. Крім того, коли охолоджувач був заповнений на 25 % ємності, температура молока досягла 4,4 °С всього за 0,5 год часу зберігання. Отже, не було потреби витратити дві години, щоб досягти температури молока 4,4 °С. Збільшення ефективності охолодження охолоджувача було обумовлено, головним чином, малим об'ємом молока всередині охолоджувача.

Друге завантаження молока зображено на рис. 4.4, коли охолоджувач був заповнений на 50 % ємності.

Перше завантаження (25 % від ємності охолоджувача)



Друге завантаження (100 % від ємності охолоджувача)

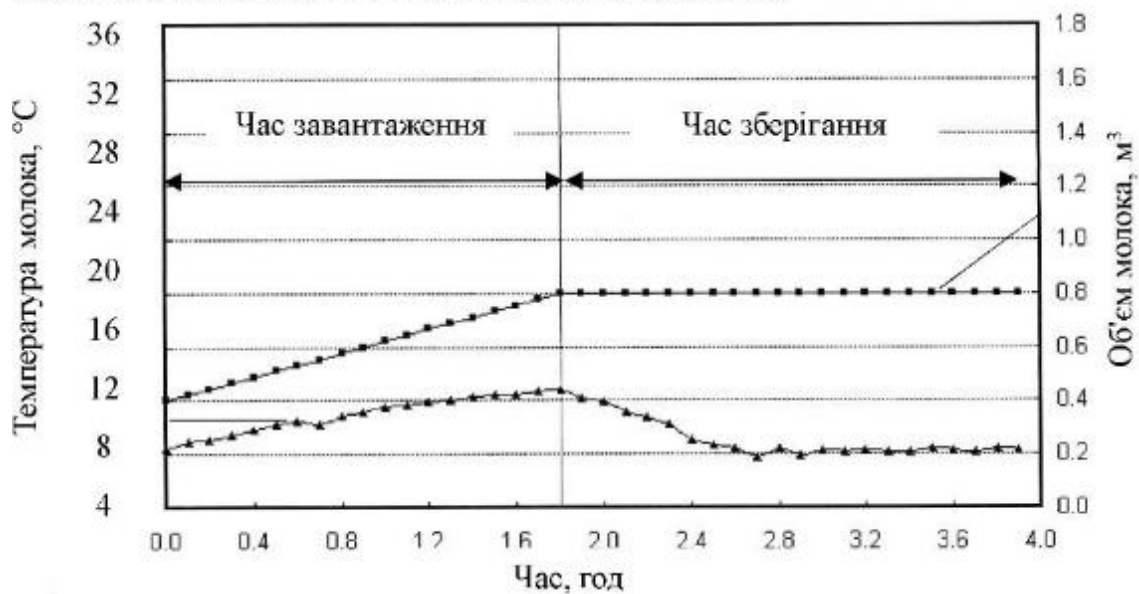


Рисунок 4.4 – Динаміка об'єму молока всередині бункерного охолоджувача та його відповідна температура з часом завантаження та зберігання для експериментів зі збором молока через день

Завантаження молока в охолоджувач і відповідна температура під час завантаження та зберігання наведені на рис. 4.4 і в таблиці 4.5. На початку другого завантаження об'єм молока становив 0,4 м³, а температура – 4,4 °С. Протягом перших 0,1 год після завантаження об'єм молока становив 0,422 м³ (збільшився на 5,5 %), а температура – 4,9 °С (підвищилася на 0,18 %). Через 0,2 год об'єм молока збільшився з 0,422 до 0,444 м³ (на 5,21 %), а температура підвищилася до 5,1 °С (на 0,07 %). Таке невелике підвищення температури молока було очікуваним через завантаження охолоджувача свіжим молоком. Через 1,8 год об'єм молока досяг 0,8 м³ (приблизно 50 % ємності охолоджувача), а температура становила 8,9 °С (бажана температура для безпечного зберігання молока для продажу чи переробки). Отримані результати відповідали умовам другого завантаження для стандартів охолоджувальної здатності (коли охолоджувач заповнюється молоком до 50 % ємності, і температура молока не повинна перевищувати 10 °С).

Таблиця 4.4 – Характеристики бункерного охолоджувача, розробленого для збору молока через день під час першого завантаження (25% ємності охолоджувача)

Кількість разів завантаження	Час, год	Об'єм молока, м ³	Температура молока, °С	Стандарти охолодження, °С
1	0,1	0,022	27,1	–
2	0,2	0,044	28,2	–
18	1,8	0,4	10,7	–
–	1,9	0,4	9,6	–
–	2,3	0,4	4,1	–
–	2,8	0,4	3,6	≤ 10,0
–	3,8	0,4	4,0	≤ 4

Було важливо відзначити, що температура молока значно підвищувалася під час другого завантаження молока, особливо коли молоко постійно додавалося в охолоджувач. Навпаки, коли час завантаження завершувався, температура молока почала поступово знижуватися, доки не досягла рекомендованого рівня для

безпечного зберігання. Наприклад, під час другого завантаження молока температура молока підвищилася з 4,3 до 13,8 ° С (на 3,43 %) і з 4,9 до 8,9 ° С (на 1,44 %) для експериментів зі збору молока щодня та через день відповідно. З іншого боку, під час першого завантаження молока і протягом часу завантаження температура молока знизилася з 29,9 до 15,6 ° С (на 4,72 %) і з 27,4 до 11 ° С (на 5,46 %) для експериментів зі збору молока щодня та через день відповідно (рис. 4.3 і 4.4).

Таблиця 4.5 – Характеристики бункерного охолоджувача, розробленого для збору молока через день під час другого завантаження (50% ємності охолоджувача)

Кількість разів завантаження	Час, год	Об'єм молока, м ³	Температура молока, К	Стандарти охолодження, °С
1	0,1	0,422	4,6	–
2	0,2	0,444	4,8	–
18	1,8	0,8	8,6	< 10,0
–	2,6	0,8	4,1	–

Охолоджувальна здатність охолоджувача молока. Для вибору та пропозиції оптимальних умов для збору молока всередині охолоджувача молока, охолоджувальна здатність оцінювалася під час першого та другого завантаження молока для експериментів зі збору щоденно та через день. Як наведено в таблиці 4.6 і показано на рис. 4.5, значення охолоджувальної здатності значно зросли з часом завантаження як для експериментів зі збору щоденно, так і для експериментів зі збору через день. Для експериментів зі збору молока щодня значення охолоджувальної здатності коливались від 1,487 до 26,020 МДж/год і від 0,093 до 30,574 МДж/год при першому та другому завантаженні молока відповідно, оскільки час з моменту завантаження пройшов від 0,1 до 1,8 год. З іншого боку, для експериментів зі збору молока через день значення охолоджувальної здатності коливались від 0,945 до 21,467 МДж/год і від 0,344 до 18,296 МДж/год при першому та другому завантаженні молока відповідно,

оскільки час пройшов від 0,1 до 1,8 год. В цілому, значення охолоджувальної здатності для експериментів зі збору молока щодня були вищими, ніж для збору через день.

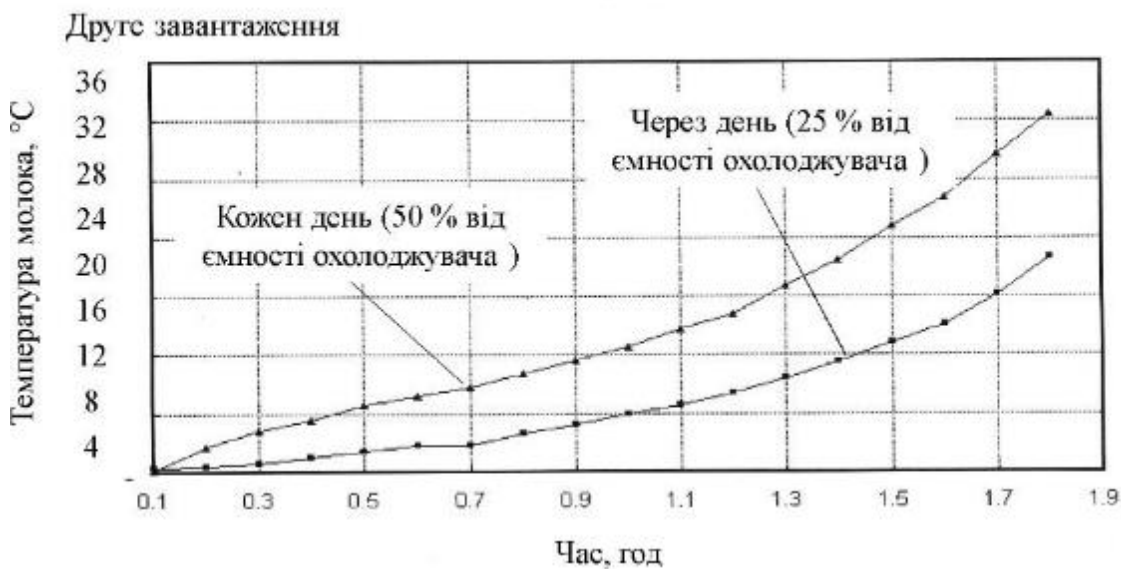
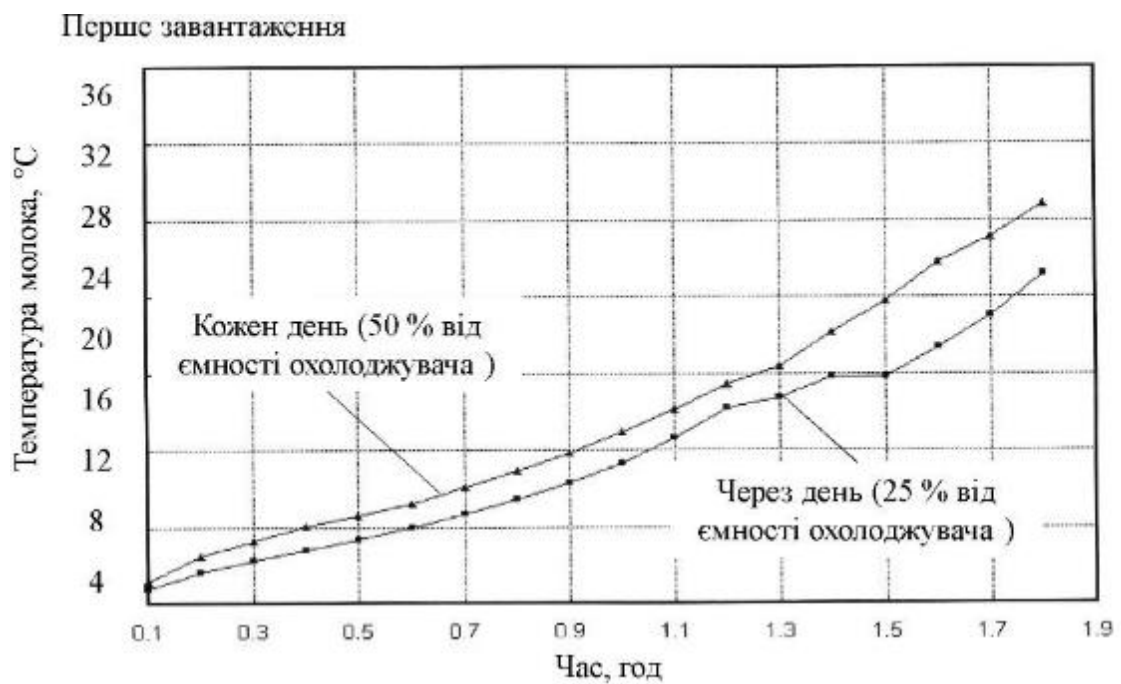


Рисунок 4.5 – Зміна холодопридатності охолоджувача об'ємного молока залежно від часу завантаження для експериментів зі збором молока як щоденно, так і через день

Таблиця 4.6 – Розраховані значення холодопридатності бродильного охолоджувача молока при різних ємностях завантаження молока та досліджуваних змінних

№ завантаження молока	Час завантаження, год	Експерименти зі збору молока через день						Експерименти з щоденним збором					
		Перше завантаження молока (25 % від ємності охолоджувача)			Друге завантаження молока (50 % від ємності охолоджувача)			Перше завантаження молока (50 % від ємності охолоджувача)			Друге завантаження молока (100 % від ємності охолоджувача)		
		Температура молока, °С	Об'єм молока, м ³	Охолоджувальна потужність, МДж/год	Температура молока, °С	Об'єм молока, м ³	Охолоджувальна потужність, МДж/год	Температура молока, °С	Об'єм молока, м ³	Охолоджувальна потужність, МДж/год	Температура молока, °С	Об'єм молока, м ³	Охолоджувальна потужність, МДж/год
1	0,1	29,6	0,044	1,487	4	0,844	0,093	27,1	0,022	0,945	4,6	0,422	0,344
2	0,2	29,9	0,089	3,108	6,3	0,889	2,208	28,2	0,044	2,073	4,8	0,444	0,527
3	0,3	25,8	0,133	4,056	7,4	0,933	3,578	24,7	0,067	2,792	5,1	0,467	0,824
4	0,4	23,5	0,178	5,008	7,9	0,978	4,443	22,7	0,089	3,538	5,5	0,489	1,264
5	0,5	21,2	0,222	5,722	8,6	1,022	5,667	20,7	0,111	4,166	5,9	0,511	1,781
6	0,6	19,8	0,267	6,546	8,9	1,067	6,506	19,5	0,133	4,911	6,2	0,533	2,276
7	0,7	19,1	0,311	7,589	9,1	1,111	7,286	18,8	0,156	5,81	6	0,556	2,259
8	0,8	18,5	0,356	8,673	9,5	1,155	8,457	18,3	0,178	6,843	6,6	0,578	3,263
9	0,9	18	0,4	9,829	9,8	1,2	9,59	17,7	0,2	7,899	6,9	0,6	4,018
10	1	17,7	0,444	11,171	10	1,244	10,661	17,3	0,222	9,174	7,2	0,622	4,901
11	1,1	17,5	0,489	12,683	10,4	1,289	12,227	17,1	0,244	10,767	7,4	0,644	5,765
12	1,2	17,3	0,533	14,311	10,6	1,333	13,552	17	0,267	12,715	7,6	0,667	6,776
13	1,3	16,6	0,578	15,454	11,2	1,378	15,909	15,5	0,289	13,39	7,8	0,689	7,972
14	1,4	16,7	0,622	17,708	11,6	1,422	18,07	14,6	0,311	14,757	8	0,711	9,397
15	1,5	16,5	0,667	19,77	12,2	1,467	21	12,8	0,333	14,738	8,2	0,733	11,113
16	1,6	16,4	0,711	22,226	12,5	1,511	23,457	12,2	0,356	16,728	8,2	0,755	12,594
17	1,7	15,8	0,755	23,96	13,1	1,555	27,105	11,3	0,378	18,731	8,4	0,778	15,109
18	1,8	15,3	0,8	26,02	13,5	1,6	30,574	10,7	0,4	21,467	8,6	0,8	18,296

Це було пов'язано з підвищенням об'єму молока, яке завантажувалося в охолоджувач, коли його заповнювали до 50 % і 100 % ємності. Для експериментів зі збору молока щодня, під час першого завантаження, коли об'єм молока залишався постійним на 0,8 м³, а температура коливалася від 15,6 до 4,4 ° С, охолоджувальна здатність охолоджувача становила 26,020 МДж/год, тоді як час зберігання пройшов від 1,8 до 3,2 год. Аналогічно, охолоджувальна здатність охолоджувача становила 30,574 МДж/год при постійному об'ємі молока 1,6 м³, тоді як температура молока коливалася від 13,8 до 4,4 ° С, а час зберігання – від 1,8 до 3,8 год. Як наведено в таблиці 4.6, під час другого завантаження охолоджувальна здатність зросла на 17,51 % порівняно з першим. Збільшення охолоджувальної здатності сталося через збільшення об'єму молока всередині охолоджувача, що відбувалося під час другого завантаження для збору молока щодня.

Для експериментів зі збору молока через день, при постійному об'ємі молока 0,4 м³ під час першого завантаження, охолоджувальна здатність охолоджувача становила 21,467 МДж/год, тоді як температура молока коливалася від 11 до 4,4 ° С, а час зберігання пройшов від 1,8 до 2,3 год. Подібним чином охолоджувальна здатність була визначена під час другого завантаження і становила 18,296 МДж/год, коли об'єм молока залишався постійним на 0,8 м³, а температура молока коливалася від 8,9 до 4,4 ° С. Одночасно час зберігання пройшов від 1,8 до 2,6 год. Як зазначено в таблиці 4.6, охолоджувальна здатність зменшилася на 14,77 %. Це зниження могло бути пов'язане зі збільшенням часу зберігання під час другого завантаження молока.

Визначення ємності охолоджувача молока. Що стосується другого завантаження молока для експериментів зі збору щоденно, коли об'єм молока всередині охолоджувача залишався постійним на 1,6 м³ (приблизно 100 % ємності охолоджувача), температура молока становила 13,8 ° С і не відповідала стандартам охолоджувальної здатності для щоденного збору молока, оскільки

температура молока за цих умов не повинна перевищувати 10°C . Тому, як наведено в Таблиці 7, існувала нагальна потреба розрахувати відповідний і безпечний об'єм молока, використовуючи метод арифметичної інтерполяції.

Як зазначено в таблиці 4.7, було необхідно додавати $0,027\text{ м}^3$ кожні $0,1$ год під час другого завантаження молока, замість $0,044\text{ м}^3$, щоб уникнути підвищення температури молока. Якщо кількість завантажень молока під час другого завантаження становила 18 разів, то загальний об'єм молока можна було розрахувати як: $18 \times 0,027 = 0,486\text{ м}^3$. Відповідно, ємність охолоджувача молока під час першого та другого завантаження для експериментів зі збору молока щодня становитиме $0,800 + 0,486 = 1,286\text{ м}^3$. З вищезазначених результатів можна зробити висновок, що для підтримки температури молока на рекомендованому рівні охолоджувач повинен бути заповнений лише приблизно на $60,75\%$ ($0,486\text{ м}^3$) своєї ємності під час другого завантаження молока та лише приблизно на $80,38\%$ ($1,286\text{ м}^3$) під час першого та другого завантажень в цілому.

Таблиця 4.7 – Зручний об'єм молока всередині охолоджувача об'ємного молока для експериментів з щоденним та через день збором молока

При другому завантаженні молока	Температура молока, $^{\circ}\text{C}$	Об'єм молока для кожні $0,1$ години, м^3
Експерименти зі збором молока щодня	13,8	0,044
Стандарти охолоджувальної потужності для експериментів зі збором молока щодня та через день	$<10 \approx 9,9$	0,027
Експерименти зі збором молока через день	8,9	0,022

Одним з важливих результатів, отриманих у цій роботі, була мультиплікативна модель. Було розроблено чотири рівняння множинної лінійної регресії для опису зв'язку між охолоджувальною здатністю охолоджувача як залежною змінною та часом завантаження молока, температурою молока і

об'ємом молока як незалежними змінними. Як зазначено в таблиці 4.8, константи цієї мультиплікативної моделі були визначені шляхом проведення аналізу множинної лінійної регресії. Мультиплікативна модель мала наступну форму:

$$CC = a_0 + b_1t + b_2T + b_3V. \quad (4.2)$$

де CC – охолоджувальна здатність охолоджувача молока, МДж/год; t – час завантаження молока, год; T – температура молока, К; V – об'єм молока, м³; a_0 – точка перетину по осі Y , b_1 , b_2 і b_3 – коефіцієнти регресії.

Таблиця 4.8 – Коефіцієнти регресії, що описують взаємозв'язок між охолоджувальною потужністю та досліджуваними змінними

Охолоджуюча здатність		Перетин з віссю Y (a_0)	Регресійні коефіцієнти			Коефіцієнт детермінації (R^2)
			b_1	b_2	b_3	
Щоденний збір	Перше завантаження молока (50 % від ємності охолоджувача)	-146,210	+51,439	+0,483	-76,320	0,9
	Друге завантаження молока (100 % від ємності охолоджувача)	+75,947	+17,759	-0,280	-1,091	0,946
Збір молока через день	Перше завантаження молока (25 % від ємності охолоджувача)	-147,401	-80,858	+0,487	+435,106	0,987
	Друге завантаження молока (50 % від ємності охолоджувача)	+2395,376	+275,214	-7,020	-1119,748	0,964

Точність зв'язків вимірювалася коефіцієнтами множинного визначення (R^2). Коефіцієнти визначення були більшими за 0,964 у більшості випадків (таблиця 4.8). На практиці використання попередніх зв'язків можна застосувати для прогнозування значень охолоджувальної здатності охолоджувача в межах розроблених експериментальних обмежень досліджуваних змінних.

Рекомендації щодо експлуатації охолоджувача молока можуть бути викладені в наступній таблиці 4.9.

Таблиця 4.9 – Рекомендовані операції охолоджувача об'ємного молока залежно від ситуації

Параметр продуктивності	Експерименти з щоденним збором молока		% змін	Експерименти з збором молока через день		% змін
	Наприкінці першого завантаження	Наприкінці другого завантаження		Наприкінці першого завантаження	Наприкінці другого завантаження	
Ємність охолоджувача, м ³	0,800	1,600	100	0,400	0,800	100
Ємність охолоджувача відповідно до стандартів охолоджувальної потужності, м ³	0,800	1,286	60,75	0,400	0,800	100
Температура молока, °C	15,6	213,8	0,62	11	8,9	0,74
Час завантаження молока, год	1,8	1,8	-	1,8	1,8	-
Охолоджувальна потужність охолоджувача, МДж/год	26,020	30,574	17,51	21,467	18,296	14,77

4.4 Висновки з розділу

Для калібрування та оцінки роботи охолоджувача молока за умов щоденного збору та збору через день слід врахувати наступні висновки:

1. Рекомендації щодо експлуатації охолоджувача молока можуть бути викладені в наступній таблиці 4.9.

2. Для експериментів зі збору молока щодня ємність охолоджувача молока не повинна перевищувати 80,38 % (1,286 м³) молока, щоб підтримувати температуру молока на рекомендованому рівні для безпечного зберігання та реалізації.

3. Під час другого завантаження молока температура молока підвищилась на 3,43 % і 1,44 % для експериментів зі збору молока щодня і через день відповідно. У той же час під час першого завантаження температура молока зменшилась на 4,72 % і 5,46 % для експериментів зі збору молока щодня і через день відповідно.

5 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях на молочно-товарній фермі, особливо в процесах охолодження молока, є критично важливими аспектами, що забезпечують здоров'я та безпеку працівників, а також ефективність виробництва. Надійне охолодження молока є основою для підтримання його якості та безпечності, однак воно супроводжується певними небезпечними та шкідливими факторами, які потребують ретельної оцінки та управління.

Небезпечні та шкідливі фактори у робочому середовищі. На молочно-товарній фермі із системами автоматичного охолодження молока існує ряд небезпечних та шкідливих факторів:

1. *Фізичні фактори:*

- Вібрація від обладнання, що може призводити до хвороб опорно-рухового апарату.
- Шум від роботи насосів і компресорів, що перевищує допустимі норми, може викликати порушення слуху.

2. *Хімічні фактори:*

- Використання хімічних речовин для очищення обладнання може призводити до контактних дерматитів або респіраторних захворювань.

3. *Механічні фактори:*

- Небезпека травмування при роботі з механізмами, такими як різак та шнекові транспортери, а також падіння при виконанні робіт на висоті.

4. *Електричні фактори:*

- Використання електричного обладнання та системи автоматизації потребують дотримання правил безпеки для запобігання електротравмам.

5. *Теплові фактори:*

– Наявність великої кількості обладнання, яке генерує тепло, може призводити до перегріву робочої зони та зневоднення працівників.

Методи захисту працівників. Для захисту працівників від небезпечних та шкідливих факторів на робочому місці застосовуються наступні методи:

1. Індивідуальні засоби захисту (ІЗЗ):

– Використання захисних рукавичок, окулярів та спеціального одягу для роботи з хімічними речовинами.

– Застосування захисних навушників та шумозахисних вставок для зменшення впливу шуму.

2. Організаційні заходи:

– Проведення інструктажів з охорони праці та безпеки на робочому місці.

– Регулярний моніторинг стану робочого середовища та оцінка ризиків.

3. Технічні засоби:

– Оснащення робочих місць системами вентиляції для зниження концентрації шкідливих парів.

– Використання автоматизованих систем контролю за температурою і вологістю для забезпечення оптимальних умов.

Правила безпечного виконання робіт. При роботі із обладнанням технологічної лінії охолодження молока працівники повинні дотримуватись наступних правил безпеки:

1. Перед початком роботи необхідно провести інструктаж з охорони праці.

2. Перевіряти справність обладнання перед використанням, особливо електричних систем.

3. Використовувати лише справні ІЗЗ і забезпечити їх належне зберігання.

4. У разі виявлення неполадок в обладнанні терміново повідомити керівника.

5. Уникати роботи в одиночку при виконанні складних операцій або під час технічного обслуговування.

6. Під час очищення та обслуговування обладнання обов'язково вимикати його від електромережі.

Дії під час надзвичайних ситуацій. У випадку виникнення надзвичайних ситуацій, таких як пожежа, викид небезпечних речовин або поломка обладнання, працівники повинні дотримуватись наступних рекомендацій:

1. Негайно повідомити про надзвичайну ситуацію керівництво та слідувати встановленим процедурам евакуації.

2. Використовувати вогнегасники для гасіння невеликих загорянь та уникати паніки.

3. У разі викиду небезпечних речовин закрити всі вікна та двері, щоб запобігти розповсюдженню шкідливих парів.

4. При евакуації дотримуватись маршруту, зазначеного в планах евакуації, та не повертатись до небезпечної зони до отримання дозволу.

5. Після евакуації, допомогти в наданні першої допомоги постраждалим, якщо це можливо.

Забезпечення охорони праці та безпеки в надзвичайних ситуаціях на молочно-товарній фермі з центром охолодження молока є важливим завданням для збереження здоров'я працівників та ефективного функціонування виробництва. Розуміння небезпечних факторів, впровадження заходів захисту, дотримання правил безпеки та знання дій у надзвичайних ситуаціях – це ключові елементи, які сприяють створенню безпечного робочого середовища.

6 ЕКОНОМІЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ УДОСКОНАЛЕНОГО ОХОЛОДЖУВАЧА МОЛОКА

Для розрахунку економічної ефективності удосконаленого охолоджувача молока в порівнянні з базовим, проведемо детальний аналіз затрат за такими напрямками: електроенергія, оплата праці, амортизація, ремонт і технічне обслуговування. Вхідні дані наведені в таблиці 6.1.

Таблиця 6.1 – Вхідні дані

Параметр	Значення
Об'єм охолоджувача	1600 л
Кількість охолоджувачів	1
Щоденне виробництво молока	2500 л
Час завантаження молока	1,8 год
Охолоджувальна потужність (удосконалений)	18,296 МДж/год
Охолоджувальна потужність (базовий)	30,574 МДж/год
Обслуговуючий персонал	1 людина (2 години на день)
Ціна 1 кВт електроенергії	5,6 грн/кВт
Оплата праці	80 грн/год
Коефіцієнт відрахування на ремонт і ТО	15%
Коефіцієнт відрахування на амортизацію	15%
Вартість базового охолоджувача	220000 грн
Вартість удосконаленого охолоджувача	240000 грн

1. Розрахунок річних витрат на електроенергію

– Розрахунок часу охолодження молока:

для базового охолоджувача: $T_6 = 2500 \text{ л} / 1600 \text{ л} \times 1,8 \text{ год} = 2,8125 \text{ год}$

для удосконаленого охолоджувача: $T_y = 2500 \text{ л} / 1600 \text{ л} \times 1,8 \text{ год} = 2,8125 \text{ год}$

– споживана потужність (кВт):

для базового охолоджувача: $P_6 = 30,574 \text{ МДж/год} / 3,6 = 8,49 \text{ кВт}$

для удосконаленого охолоджувача: $P_y = 18,296 \text{ МДж/год} / 3,6 = 5,08 \text{ кВт}$

– щоденні витрати електроенергії:

для базового охолоджувача: $E_6 = 8,49 \text{ кВт} \times 2,8125 \text{ год} = 23,88 \text{ кВт}$

для удосконаленого охолоджувача: $E_y = 5,08 \text{ кВт} \times 2,8125 \text{ год} = 14,33 \text{ кВт}$

– річні витрати на електроенергію:

для базового охолоджувача: $E_6 = 23,88 \text{ кВт} \times 5,6 \text{ грн} \times 365 = 48665,76 \text{ грн}$

для удосконаленого охолоджувача: $E_y = 14,33 \text{ кВт} \times 5,6 \text{ грн} \times 365 = 29473,36 \text{ грн}$

2. Розрахунок річних витрат на оплату праці

$\Pi = 80 \text{ грн/год} \times 2 \text{ год} \times 365 \text{ днів} = 58,400 \text{ грн}$

3. Розрахунок амортизації

для базового охолоджувача:

$A_6 = 220000 \text{ грн} \times 0,15 = 33000 \text{ грн}$

для удосконаленого охолоджувача:

$A_y = 240000 \text{ грн} \times 0,15 = 36000 \text{ грн}$

4. Розрахунок витрат на ремонт і технічне обслуговування

для базового охолоджувача:

$R_6 = 220000 \text{ грн} \times 0,15 = 33000 \text{ грн}$

для удосконаленого охолоджувача:

$R_y = 240000 \text{ грн} \times 0,15 = 36000 \text{ грн}$

5. Загальні витрати

для базового охолоджувача:

$C_6 = 48665,76 + 58400 + 33000 + 33000 = 173065,76 \text{ грн}$

для удосконаленого охолоджувача:

$C_y = 29473,36 + 58400 + 36000 + 36000 = 159873,36 \text{ грн}$

6. Економічний ефект і строк окупності

– економічний ефект:

$E = 173065,76 - 159873,36 = 11992,4 \text{ грн}$

– строк окупності:

$T = (240000 - 220000) / 11992,4 = 166,67 \text{ днів} \approx 5,56 \text{ місяців}$

Зведені дані розрахунку наведені в таблиці 6.2.

Таблиця 6.2 – Результати розрахунку економічної ефективності

Параметр	Базовий охолоджувач	Удосконалений охолоджувач
Вартість, грн	220	240
Щоденне споживання електроенергії, кВт	23,88	14,33
Річні витрати на електроенергію, грн	48665,76	29473,36
Річні витрати на оплату праці, грн	58,4	58,4
Річна амортизація, грн	33	36
Річні витрати на ремонт і ТОВ, грн	33	36
Загальні витрати, грн	173065,76	159873,36
Економічний ефект, грн	-	11992,4
Строк окупності, дні	-	166,67 (\approx 5,56 місяців)

Таким чином, удосконалений охолоджувач є більш економічно вигідним варіантом порівняно з базовим.

ВИСНОВКИ

1. Центри охолодження молока є критично важливими для підтримки якості молока, ефективно знижуючи його температуру до 4 °С і зменшуючи енергетичні витрати за рахунок двоетапної системи охолодження. Використання попереднього охолодження з доступних водних ресурсів може знизити витрати на охолодження до 64%, залежно від температурної різниці. Розглянуті різні варіанти охолодження, включаючи резервуари з льодовим банком та системи прямого розширення, що мають свої переваги і недоліки, які залежать від умов експлуатації. Вибір оптимальної технології має враховувати економічну ефективність, надійність електропостачання та екологічні стандарти, що, в свою чергу, забезпечує зниження загальних витрат на охолодження молока та покращення його якості.

2. У результаті дослідження було виявлено, що загальні коефіцієнти теплопередачі ємностей для охолодження молока суттєво залежать від їх геометричної форми та місткості. Для вертикальних ємностей цей показник залишається стабільним (близько 0,3 кВт/м²·К) незалежно від обсягу, тоді як у горизонтальних він варіюється від 0,2 до 0,4 кВт/м²·К. З метою запобігання замерзанню молока горизонтальні циліндричні ємності вимагають більшої площі теплопередачі через нижчі значення загального коефіцієнта теплопередачі. Хоча вертикальні ємності демонструють вищу енергоефективність, горизонтальні ємності забезпечують зручність у використанні, незважаючи на виклики, пов'язані з їх розміщенням та очищенням.

3. Обчислювальна модель охолодження молока, розроблена з використанням методу кінцевих елементів (FEM), виявилася ефективним інструментом для аналізу та оптимізації умов охолодження в молочній промисловості. Модель враховує ключові фізичні параметри, такі як температура та теплопередача, що дозволяє точно прогнозувати поведінку системи в реальному

часі. Результати симуляцій, які показали середню абсолютну відносну помилку лише 1,20 % у часі охолодження для різних об'ємів, підтверджують надійність моделі. Це відкриває нові можливості для оптимізації технологічних процесів охолодження молока, що має велике значення для підвищення ефективності в галузі.

4. Для ефективного калібрування та оцінки роботи охолоджувача молока важливо дотримуватися рекомендацій щодо його експлуатації. Зокрема, під час щоденного збору молока ємність охолоджувача не повинна перевищувати 80,38 % (1,286 м³) для забезпечення безпечного зберігання та реалізації продукту. Результати експериментів показують, що під час другого завантаження температура молока підвищується на 3,43 % у випадку щоденного збору та на 1,44 % при зборі через день. Водночас під час першого завантаження спостерігається зниження температури на 4,72 % і 5,46 % відповідно, що вказує на важливість контролю температури в процесі охолодження для підтримки якості молока.

5. Забезпечення охорони праці та безпеки в надзвичайних ситуаціях на молочно-товарній фермі з центром охолодження молока є важливим завданням для збереження здоров'я працівників та ефективного функціонування виробництва. Розуміння небезпечних факторів, впровадження заходів захисту, дотримання правил безпеки та знання дій у надзвичайних ситуаціях – це ключові елементи, які сприяють створенню безпечного робочого середовища.

6. Результати аналізу економічної ефективності удосконаленого охолоджувача молока свідчать про його переваги порівняно з базовим варіантом. Загальні річні витрати на експлуатацію удосконаленого охолоджувача становлять 159873,36 грн, що на 11992,4 грн менше, ніж витрати на базовий охолоджувач. Зниження витрат на електроенергію, разом із збереженням однакових витрат на оплату праці, свідчить про підвищення економічної ефективності. Строк окупності нового обладнання складає приблизно 5,56 місяців, що робить удосконалений охолоджувач вигідним інвестиційним рішенням для молочної промисловості.

Бібліографія

1. Алієв Е. Б. (2023). Чисельне моделювання процесів агропромислового виробництва: підручник. Київ: Аграрна наука, 340 с. ISBN 978-966-540-584-9. DOI: 10.31073/978-966-540-584-9
2. Шевченко, І.А., Алієв, Е.Б. (2013). Науково-методичні рекомендації з багатокритеріального виробничого контролю доїльних установок. За редакцією доктора технічних наук, професора, член-кореспондента НААН України, І.А. Шевченка – Запоріжжя: Акцент Інвест-трейд. 156 с. ISBN 978-966-2602-41-VIII.
3. Atangana, A., & Balenu, D. (2016). New fractional derivatives with non-local and non-singular kernel theory and application to heat transfer model. *Thermal Science*, 20(2), 763-769.
4. Azo Materials. (2001). Stainless Steel – Grade 304. Retrieved May 2019, from <https://www.azom.com/properties.aspx?ArticleID=965>
5. Chandan, R. C. (1997). *Dairy-Based Ingredients* (Chapter 1). Eagan Press.
6. Clínica do Leite. (2016). *Contagem Bacteriana Total. Mapa da Qualidade do Leite* (1st ed.). Piracicaba: ESALQ/USP.
7. Embrapa. (2011). *Produção de leite com qualidade na propriedade rural*.
8. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. (2011). *Instrução Normativa N° 62*.
9. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. (2018). *Projeções do Agronegócio - Brasil 2017/18 a 2027/28*. Brasília: MAPA/ACE.
10. Mohapatra, D., & Rao, P. S. (2005). A thin layer drying model of parboiled wheat. *Journal of Food Engineering*, 66, 513-518.
11. Nimdum, P., Patamaprohm, B., Renard, J., & Villalonga, S. (2015). Experimental method and numerical simulation demonstrate non-linear axial behaviour in composite filament wound pressure vessel due to thermal expansion effect. *International Journal of Hydrogen Energy*, 40, 13231-13241.

12. Ragsdale, C. T. (2009). *Modeling & Decision Analysis - Revised Edition* (1st ed.). Connecticut: Cengage.
13. Peng, P., Song, H., Zhang, T., Addy, M., Zhang, Y., Cheng, Y., & Hatzenbeller, R. (2017). Concentrated high intensity electric field (CHIEF) system for non-thermal pasteurization of liquid foods: Modeling and simulation of fluid mechanics, electric analysis, and heat transfer. *Computers and Chemical Engineering*, 97, 183-193.
14. Sheikholeslami, M., & Ganji, D. D. (2014). Ferrohydrodynamic and magnetohydrodynamic effects on ferrofluid flow and convective heat transfer. *Energy*, 75, 400-410.
15. Sheikholeslami, M., Ganji, D. D., Javed, M. Y., & Ellahi, R. (2015). Effect of thermal radiation on magnetohydrodynamics nano fluid flow and heat transfer by means of two phase model. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 374, 36-43.
16. Zhao, B. (2014). Temperature-coupled field analysis of LPG tank under fire based on wavelet finite element method. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 117, 413-422.
17. Cengel, Y. A. (2011). *Heat and mass transfer: A practical approach* (3rd ed.). Güven Bilimsel.
18. Geankoplis, C. J. (2003). *Transport processes and unit operations* (Includes unit operations). Prentice Hall Press.
19. Gossard, J. J. (2011). *Numerical simulation of the steady-state thermal-hydraulic performance of microchannel and minichannel evaporators with headers and louvered fins*. Miami University.
20. Hermes, C. J. L., & Melo, C. (2009). Assessment of the energy performance of household refrigerators via dynamic simulation. *Applied Thermal Engineering*, 29(5), 1153–1165.
21. Hermes, C. J. L., Melo, C., Knabben, F. T., & Gonçalves, J. M. (2009). Prediction of the energy consumption of household refrigerators and freezers via steady-state simulation. *Applied Energy*, 86(7), 1311–1319.

22. Holm, C., Jepsen, L., Larsen, M., & Jespersen, L. (2004). Predominant microflora of downgraded Danish bulk tank milk. *Journal of Dairy Science*, 87(5), 1151–1157.
23. Hovgaard, T. G., Boyd, S., Larsen, L. F. S., & Jørgensen, J. B. (2013). Nonconvex model predictive control for commercial refrigeration. *International Journal of Control*, 86(8), 1349–1366.
24. Hovgaard, T. G., Larsen, L. F. S., Edlund, K., & Jørgensen, J. B. (2012). Model predictive control technologies for efficient and flexible power consumption in refrigeration systems. *Energy*, 44(1), 105–116.
25. Larsen, L. F. S., Thybo, C., & Rasmussen, H. (2007). Potential energy savings optimizing the daily operation of refrigeration systems. In *Control conference (ECC), European, IEEE*, 4759–4764.
26. Lewis, M. J., Heppell, N., & Hastings, A. (2000). Continuous thermal processing of foods—Pasteurization and UHT sterilization.
27. Robnik-Šikonja, M., & Kononenko, I. (2003). Theoretical and empirical analysis of ReliefF and RReliefF. *Machine Learning*, 53(1-2), 23–69.
28. Shafiei, S. E., Rasmussen, H., & Stoustrup, J. (2013). Modeling supermarket refrigeration systems for demand-side management. *Energies*, 6(2), 900–920.
29. Sossan, F., Lakshmanan, V., Costanzo, G. T., Marinelli, M., Douglass, P. J., & Bindner, H. (2016). Grey-box modelling of a household refrigeration unit using time series data in application to demand side management. *Sustainable Energy, Grids and Networks*, 5, 1–12.
30. Tangwe, S., Simon, M., & Meyer, E. (2014). Mathematical modeling and simulation application to visualize the performance of retrofit heat pump water heater under first hour heating rating. *Renewable Energy*, 72, 203–211.
31. Upton, J., Murphy, M., French, P., & Dillon, P. (2010). Dairy farm energy consumption. In *Dairying: entering a decade of opportunity* (pp. 87–97). Teagasc National Dairy Conference.

32. Upton, J., Murphy, M., Shalloo, L., Koerkamp, P. W. G., & De Boer, I. J. M. (2014). A mechanistic model for electricity consumption on dairy farms: Definition, validation, and demonstration. *Journal of Dairy Science*, 97(8), 4973–4984.
33. CleanTechnica. (2014). How the IEA underestimates the solar industry. <http://cleantechnica.com/2014/03/07/iea-underestimates-solar-industry/>
34. Donnelly, E. (2012). Comparison of ice-bank actual results against simulated predicted results in Carroll refurbishment project DKIT. *Journal of Sustainable Design and Applied Research*, 1(2), article 3. <http://arrow.dit.ie/sdar/vol1/iss2/3>
35. Draaijer, J. (2002). Milk collection, processing and marketing. In FAO. *Milk Producer Group Resource Book: A practical guide to assist milk producer groups* (chapter 4). Rome: FAO. <http://www.fao.org/docrep/007/y3548e/y3548e06.htm>
36. Engineering Toolbox. (n.d.). Psychrometric charts. <http://www.engineeringtoolbox.com/>
37. EPIA. (2014). Global market outlook for photovoltaics 2014–2018. European Photovoltaic Industry Association (EPIA). http://www.cleanenergybusinesscouncil.com/site/resources/files/reports/EPIA_Global_Market_Outlook_for_Photovoltaics_2014-2018_-_Medium_Res.pdf
38. FAO. (2002). *Milk Producer Group Resource Book: A practical guide to assist milk producer groups* (by J. Draaijer). Rome, Italy. <http://www.fao.org/3/a-y3548e.pdf>
39. FAO. (2004). Code of hygienic practice for milk and milk products. Rome. http://www.fao.org/fileadmin/user_upload/livestockgov/documents/CXP_057e.pdf
40. FAO. (2005). Lactoperoxidase. <http://www.fao.org/food/food-safety-quality/a-z-index/lactoperoxidase/it/>
41. FAO. (2006). Benefits and potential risks of the lactoperoxidase system of raw milk preservation: Report of a FAO/WHO technical meeting, FAO Headquarters, Rome, Italy, 28 November–2 December 2005. Rome. <http://www.fao.org/3/a-a0729e.pdf>

Дніпровський державний аграрно-економічний університет
Інженерно-технологічний факультет
Кафедра інжинірингу технічних систем

**Обґрунтування конструктивно-технологічних параметрів
охолоджувача молока**

Додатки

Виконав: магістрант групи МгАІ-3-23
Ченчевич Богдан Юрійович

Керівник: д-р техн. наук, страш. дослід.
Алієв Ельчин Бахтияр огли

Дніпро, 2024

Метою є удосконалення конструкції охолоджувача молока та обґрунтування його конструктивно-режимних параметрів

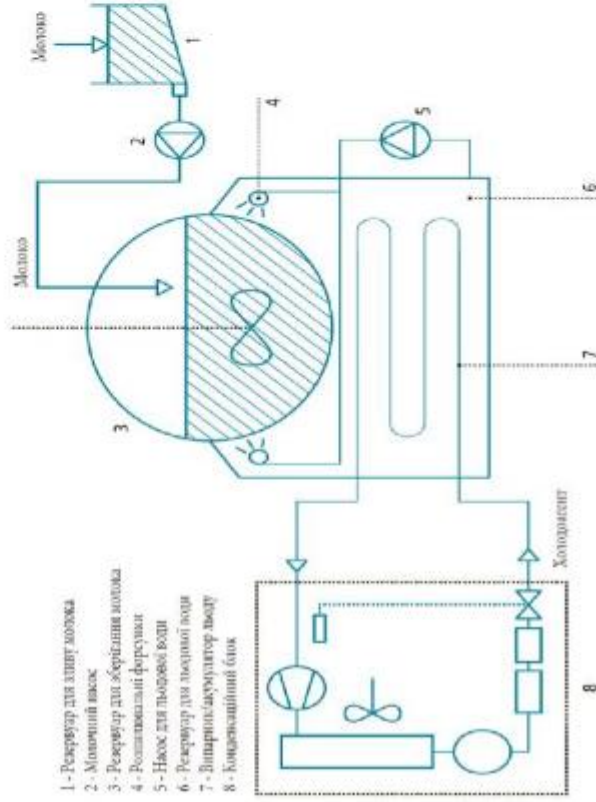
Для досягнення цієї мети передбачається виконати наступні **задачі досліджень**:

1. Визначити доцільність створення центрів охолодження молока і обґрунтувати склад їх техніко-технологічного забезпечення.
2. Провести порівняльні експериментальні дослідження охолоджувачів молока. Встановити основні параметри роботи охолоджувачів різних типів, визначити їх продуктивність, енергоефективність, а також вплив на якість молока під час зберігання.
3. Провести чисельне моделювання процесів охолодження молока. Розробити фізико-математичний апарат і чисельні моделі для оцінки теплових процесів у системах охолодження.
4. Провести експериментальні дослідження роботи удосконаленого охолоджувача молока. Вивчити технічні й експлуатаційні характеристики удосконаленого охолоджувача молока в реальних умовах.
5. Розробити заходи із забезпечення охорони праці та безпеки в надзвичайних ситуаціях.
6. Провести економічний аналіз впровадження удосконаленого охолоджувача молока.



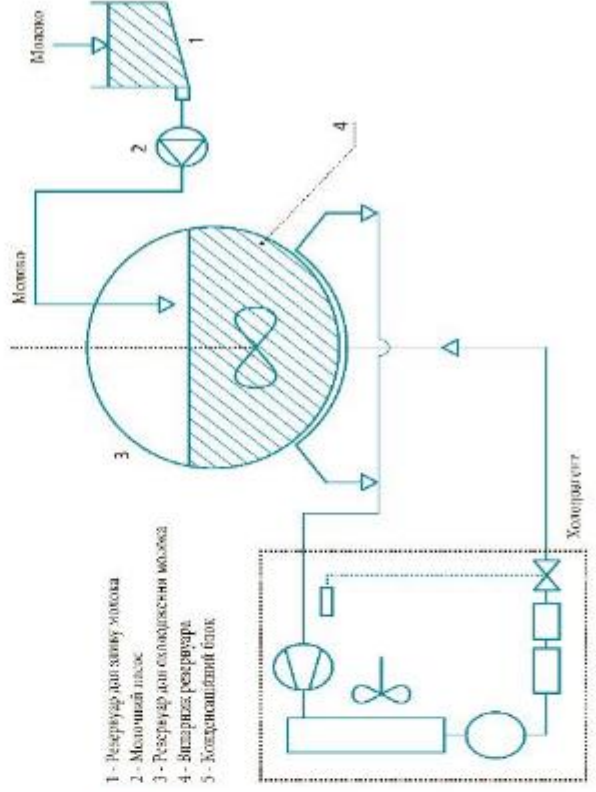
Будова центра охолодження молока

- 1 - Резервуар для зливу молока
- 2 - Молочний насос
- 3 - Резервуар для зберігання молока
- 4 - Розмешувальні форсунок
- 5 - Насос для теплової води
- 6 - Резервуар для теплової води
- 7 - Випарник/аккумулятор льоду
- 8 - Конденсаторний блок



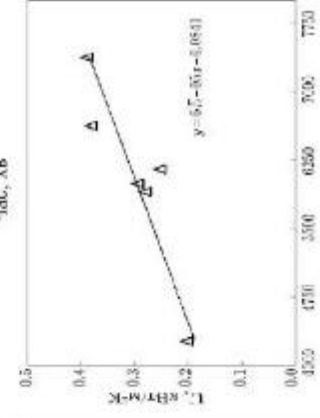
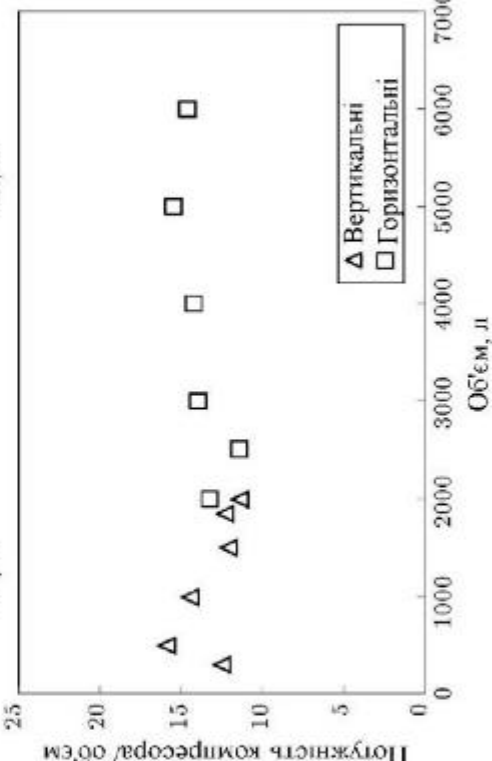
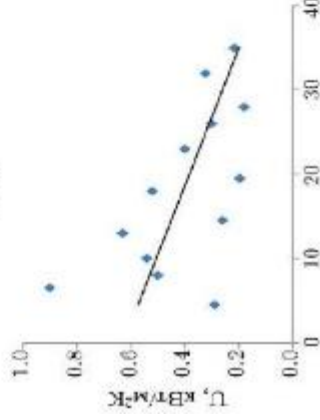
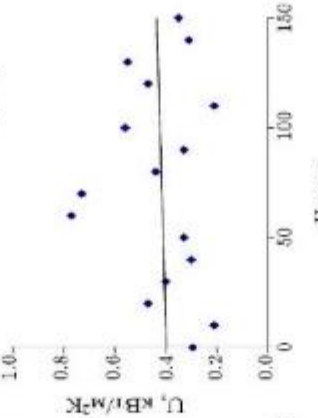
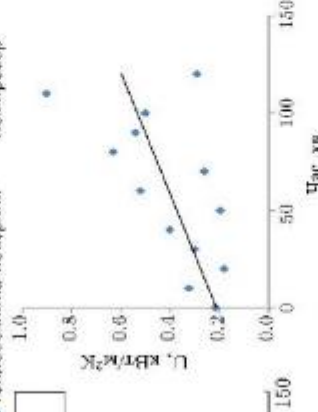
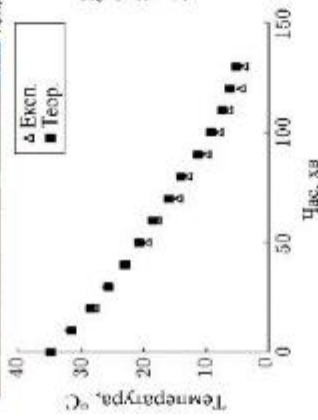
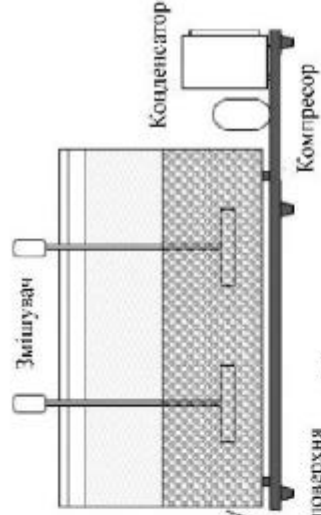
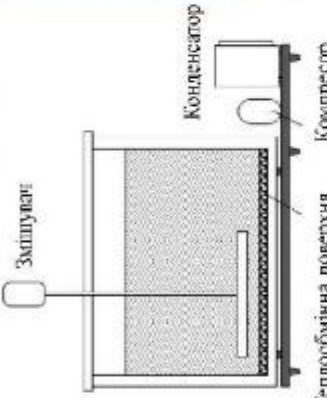
Баки для охолодження та зберігання молока з льодовим банком (ІВТ)

Резервуари для охолодження молока: відкриті (а) та закриті (б)



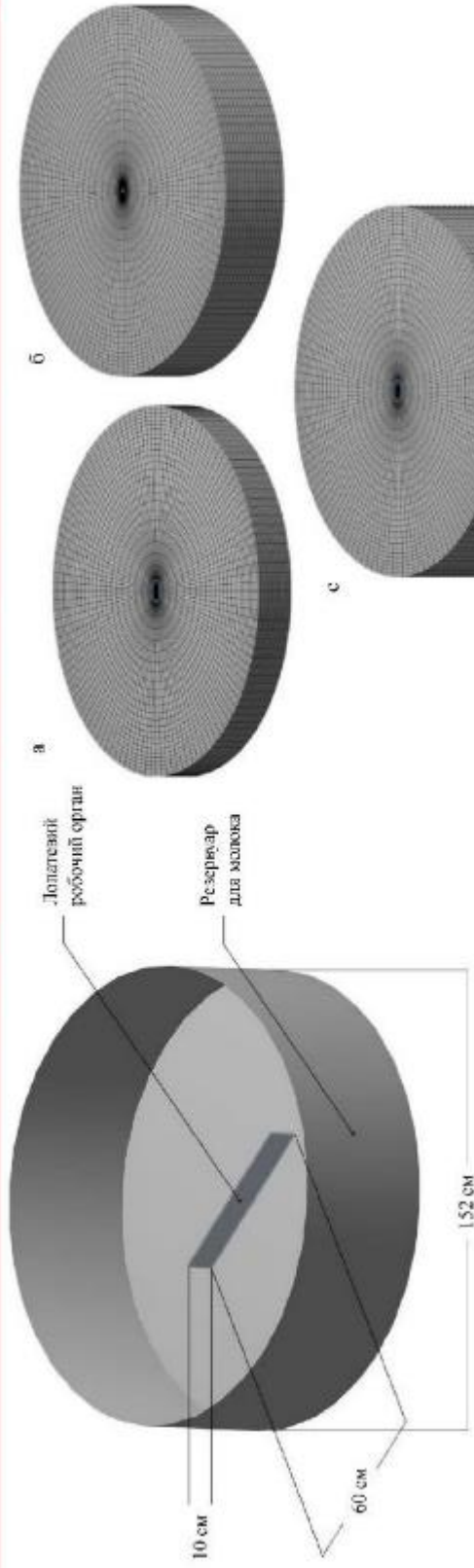
Закрита система охолодження молока прямого розширення (DX)

Порівняльні експериментальні дослідження охолоджувачів молока



Вертикальний охолоджувач

Горизонтальний охолоджувач



Геометрія, використана для представлення молока в резервуарі та лопатевого робочого органа (циліндр представляє об'єм молока, діаметр якого становить 152 см, а висота змінюється залежно від об'єму молока: 16,8 см для 305 л, 0,303 м для 550 л і 0,427 м для 775 л)

Сітки, що використовувалися:
(а) 305 л; (б) 550 л; (с) 775 л

Кількість вузлів та елементів сіток для трьох об'ємів молока, протестованих у цьому дослідженні (305, 550 та 775 літрів)

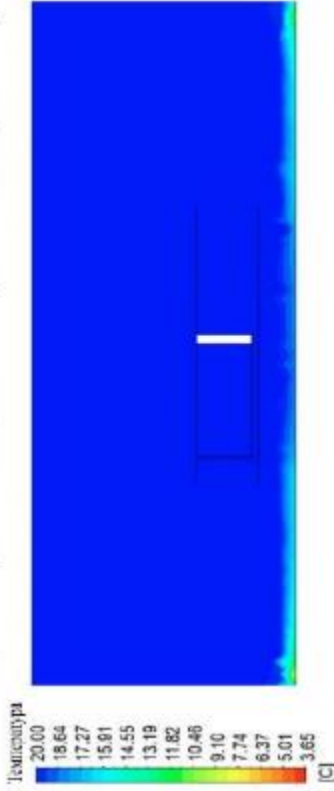
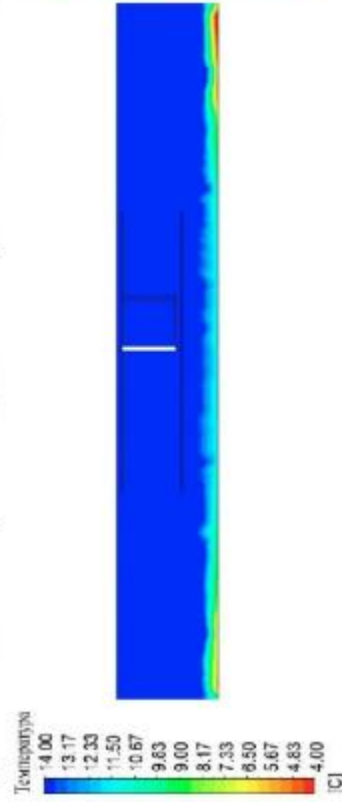
Об'єм (літри)	Вузли	Елементи
305	54976	48555
550	57136	50175
775	58816	51435

Фізичні властивості молока та нержавіючої сталі, що враховуються в моделюванні

Матеріал	Густина (кг×м ⁻³)	Специфічна теплоємність (Дж×кг ⁻¹ ×°C ⁻¹)	Теплопровідність (Вт×м ⁻¹ ×°C ⁻¹)	В'язкість (кг×м ⁻¹ ×с ⁻¹)
Молоко	1032	3890	0.53	0.002
Нержавіюча сталь	7955	510	15.5	-

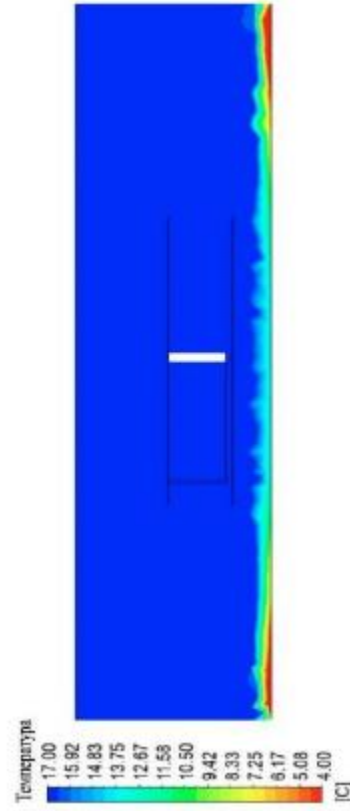
Спостереження за різними обсягами молока в баку в різні дні

Спостереження	Обсяг (м ³)	Температура (°C)		Час (хв)	Тепловий потік Ф (Вт/м ²)
		Початкова	Кінцева		
1	0,305	22,1	4,0	66,29	-3095,28
2	0,550	23,2	4,0	92,35	-4250,60
3	0,775	23,6	4,0	169,30	-3335,06

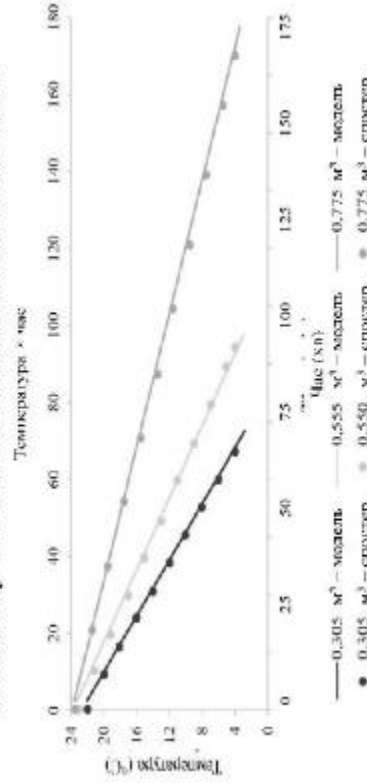


Перетин розподілу температури всередині бака для об'єму 305 л після 30 хвилин моделювання

Перетин розподілу температури всередині бака для об'єму 775 л після 30 хвилин моделювання



Перетин розподілу температури всередині бака для об'єму 550 л після 30 хвилин моделювання

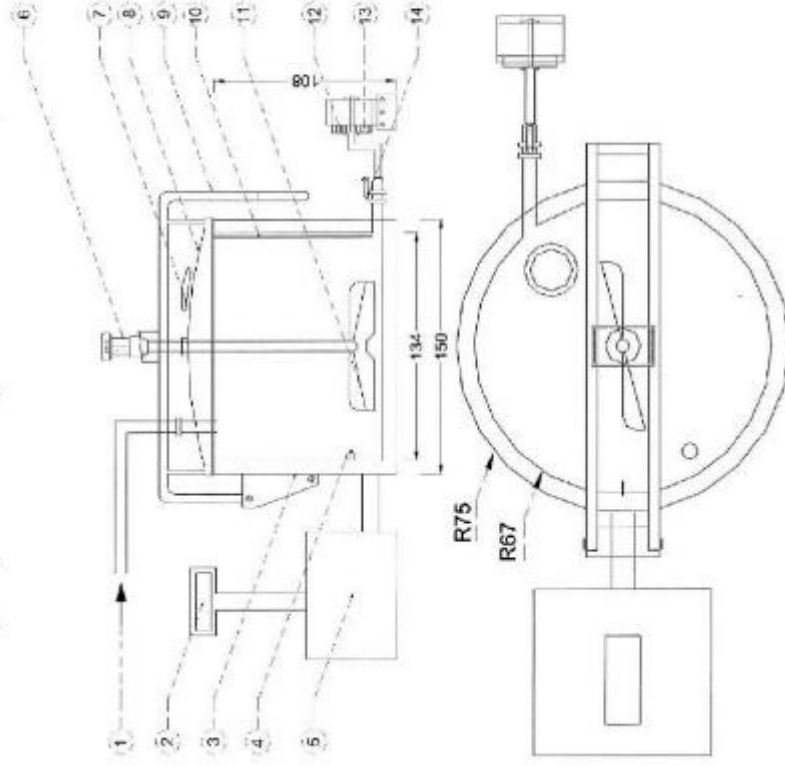


Середня температура (°C) як функція часу для різних обсягів молока

Об'ємні охолоджувачі повинні відповідати стандартам охолоджувальної здатності, які вказують такі пункти.

1. Коли молоко збирається щодня, стандарти охолоджувальної здатності такі: об'ємні охолоджувачі молока розраховані на щоденний забір і повинні охолоджувати 50 % (перше завантаження) об'єму бака з 32 °С (середня температура, при якій молоко надходить у бак) до ≤ 10 °С протягом однієї години, і до ≤ 4 °С протягом другої години з моменту зберігання молока; коли додається додаткове тепле молоко (друге завантаження та повний бак), змішана температура теплою та холодною молоком не повинна перевищувати 10 °С.

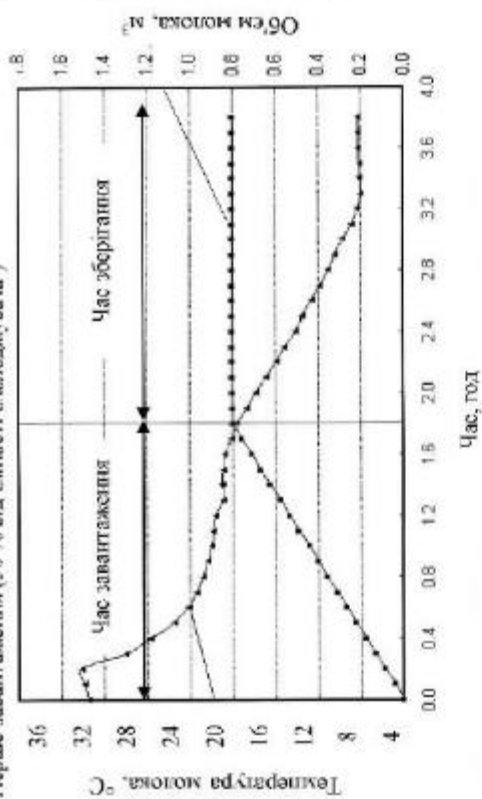
2. Коли молоко збирається через день, стандарти охолоджувальної здатності об'ємних охолоджувачів молока такі: охолоджувачі повинні охолоджувати 25 % (перше завантаження) об'єму бака з 32 °С (середня температура, при якій молоко надходить у бак) до ≤ 10 °С протягом однієї години, і до ≤ 4 °С протягом другої години з моменту зберігання молока.



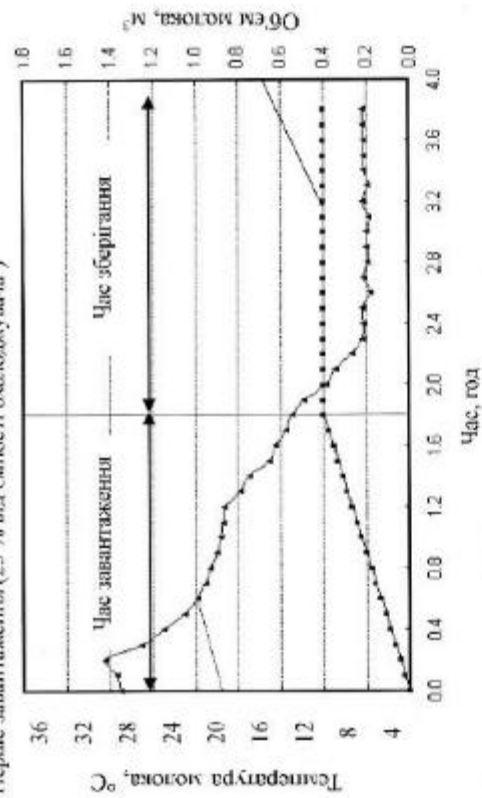
1 – вхідний канал для молока; 2 – цифровий індикатор температури; 3 – охолоджувальний бак для молока; 4 – термостат; 5 – холодительний блок; 6 – двигун; 7 – спостережне вікно; 8 – кришка; 9 – ручка; 10 – шкала смності; 11 – змішувач молока; 12 – насос; 13 – вихідний отвір для молока; 14 – ручний клапан

Геометричне зображення охолоджувача молока

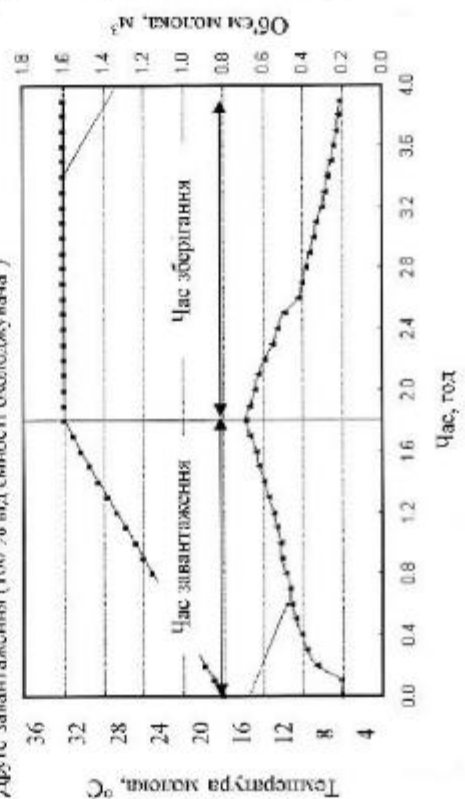
Перше завантаження (50 % від ємності охолоджувача)



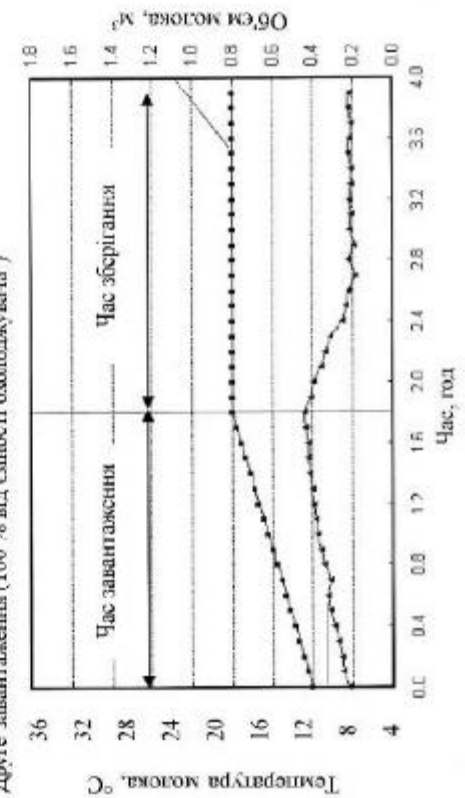
Перше завантаження (25 % від ємності охолоджувача)



Друге завантаження (100 % від ємності охолоджувача)



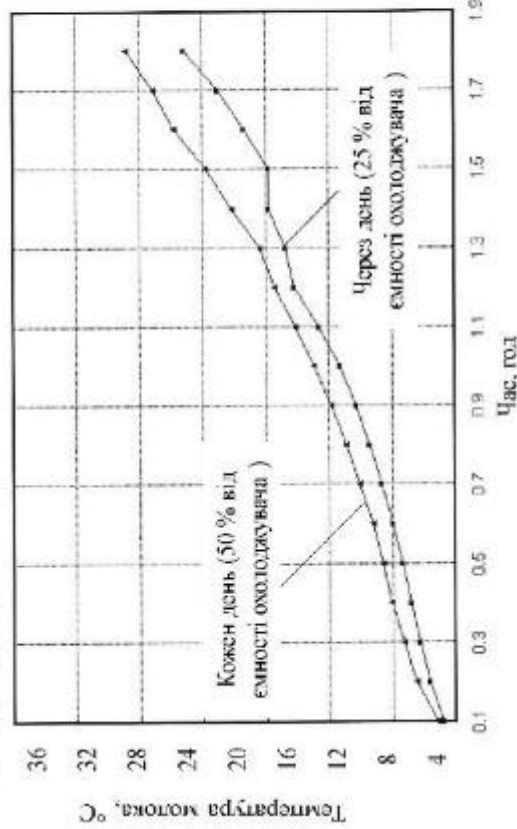
Друге завантаження (100 % від ємності охолоджувача)



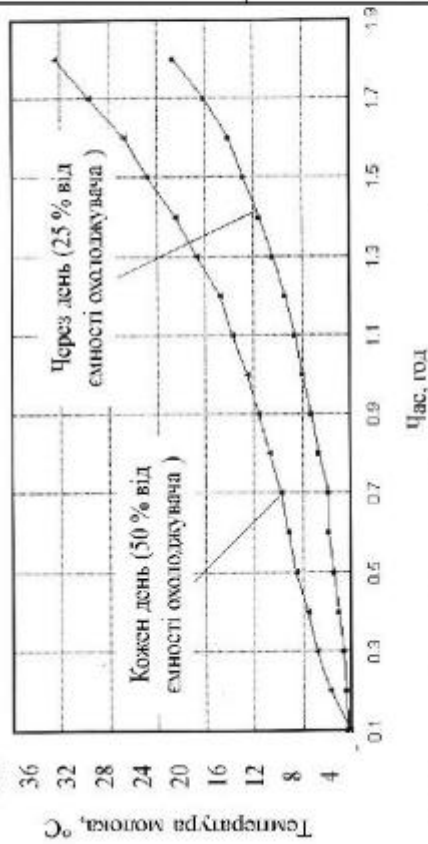
Характеристики бункерного охолоджувача, розробленого для збору молока через день під час другого завантаження (50% ємності охолоджувача)

Характеристики бункерного охолоджувача, розробленого для збору молока через день під час першого завантаження (25% ємності охолоджувача)

Перше завантаження



Друге завантаження



Зміна холодопродуктивності охолоджувача об'ємного молока залежно від часу завантаження для експериментів зі збором молока як щоденно, так і через день

Коефіцієнти регресії, що описують взаємозв'язок між охолоджувальною потужністю та досліджуваними змінними

$$CC = a_0 + b_1t + b_2T + b_3V$$

де CC – охолоджувальна здатність охолоджувача молока, МДж/год; t – час завантаження молока, год; T – температура молока, К; V – об'єм молока, м³; a_0 – точка перетину по осі Y , b_1 , b_2 і b_3 – коефіцієнти регресії

Охолоджувальна здатність	Перелік з висотою Y (а ₀)	Регресійні коефіцієнти			R ²
		b_1	b_2	b_3	
Щеплення зор	Перше завантаження молока (50% від ємності охолоджувача)	+51,439	+0,483	-76,320	0,9
	Друге завантаження молока (100% від ємності охолоджувача)	+17,759	-0,280	-1,091	0,946
Зор молока через день	Перше завантаження молока (25% від ємності охолоджувача)	-147,40	+0,487	+435,106	0,987
	Друге завантаження молока (50% від ємності охолоджувача)	+2395,3	+275,21	-1119,74	0,964

Вхідні дані

Параметр	Значення
Об'єм охолоджувача	1600 л
Кількість охолоджувачів	1
Щоденне виробництво молока	2500 л
Час завантаження молока	1,8 год
Охолоджувальна потужність (удосконалений)	18,296 МДж/год
Охолоджувальна потужність (базовий)	30,574 МДж/год
Обслуговуючий персонал	1 людина (2 години на день)
Ціна 1 кВт електроенергії	5,6 грн/кВт
Оплата праці	80 грн/год
Коефіцієнт відрахування на ремонт і ТО	15%
Коефіцієнт відрахування на амортизацію	15%
Вартість базового охолоджувача	220000 грн
Вартість удосконаленого охолоджувача	240000 грн

Результати розрахунку економічної ефективності

Параметр	Базовий охолоджувач	Удосконалений охолоджувач
Вартість, грн	220	240
Щоденне споживання електроенергії, кВт	23,88	14,33
Річні витрати на електроенергію, грн	48665,76	29473,36
Річні витрати на оплату праці, грн	58,4	58,4
Річна амортизація, грн	33	36
Річні витрати на ремонт і ТОВ, грн	33	36
Загальні витрати, грн	173065,76	159873,36
Економічний ефект, грн	-	11992,4
Строк окупності, дні	-	166,67 ($\approx 5,56$ місяців)

1. Центри охолодження молока є критично важливими для підтримки якості молока, ефективно знижуючи його температуру до 4 °C і зменшуючи енергетичні витрати за рахунок двоетапної системи охолодження. Використання попереднього охолодження з доступних водних ресурсів може знизити витрати на охолодження до 64% залежно від температурної різниці. Розглянуті різні варіанти охолодження, включаючи резервуари з льодовим банком та системи прямого розширення, що мають свої переваги і недоліки, які залежать від умов експлуатації. Вибір оптимальної технології має враховувати економічну ефективність, надійність електропостачання та екологічні стандарти, що, в свою чергу, забезпечує зниження загальних витрат на охолодження молока та покращення його якості.
2. У результаті дослідження було виявлено, що загальні коефіцієнти теплопередачі ємностей для охолодження молока суттєво залежать від їх геометричної форми та місткості. Для вертикальних ємностей цей показник залишається стабільним (близько 0,3 кВт/м²·К) незалежно від обсягу, тоді як у горизонтальних він варіюється від 0,2 до 0,4 кВт/м²·К. З метою запобігання замерзання молока горизонтальні циліндричні ємності вимагають більшої площі теплопередачі через нижчі значення загального коефіцієнта теплопередачі. Хоча вертикальні ємності демонструють вищу енергоефективність, горизонтальні ємності забезпечують зручність у використанні, незважаючи на виклики, пов'язані з їх розміщенням та очищенням.
3. Обчислювальна модель охолодження молока, розроблена з використанням методу кінцевих елементів (FEM), виявилася ефективним інструментом для аналізу та оптимізації умов охолодження в молочній промисловості. Модель враховує ключові фізичні параметри, такі як температура та теплопередача, що дозволяє точно прогнозувати поведінку системи в реальному часі. Результати симуляції, які показали середню абсолютну відносну похибку лише 1,20 % у часі охолодження для різних об'ємів, підтверджують надійність моделі. Це відкриває нові можливості для оптимізації технологічних процесів охолодження молока, що має велике значення для підвищення ефективності в галузі.
4. Для ефективного калібрування та оцінки роботи охолоджувача молока важливо дотримуватися рекомендацій щодо його експлуатації. Зокрема, під час щоденного збору молока ємність охолоджувача не повинна перевищувати 80,38 % (1,286 м³) для забезпечення безпечного зберігання та реалізації продукту. Результати експериментів показують, що під час другого завантаження температура молока підвищується на 3,43 % у випадку щоденного збору та на 1,44 % при зборі через день. Водночас під час першого завантаження спостерігається зниження температури на 4,72 % і 5,46 % відповідно, що вказує на важливість контролю температури в процесі охолодження для підтримки якості молока.
5. Результати аналізу економічної ефективності удосконаленого охолоджувача молока свідчать про його переваги порівняно з базовим варіантом. Загальні річні витрати на експлуатацію удосконаленого охолоджувача становлять 159873,36 грн, що на 11992,4 грн менше, ніж витрати на базовий охолоджувач. Зниження витрат на електроенергію, разом із збереженням однакових витрат на оплату праці, свідчить про підвищення економічної ефективності. Строк окупності нового обладнання складає приблизно 5,56 місяців, що робить удосконалений охолоджувач вигідним інвестиційним рішенням для молочної промисловості.