

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ПОЛІСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
Факультет інженерії та енергетики  
Кафедра агроінженерії та технічного сервісу

Кваліфікаційна робота  
на правах рукопису

**СУБИН ЛЕОНІД ЮРІЙОВИЧ**

УДК 637.133.1

**КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА**  
**Обґрунтування параметрів енергозберігаючої системи**  
**охолодження молока**

(тема роботи)

208 «Агроінженерія»

---

(шифр і назва спеціальності)

Подається на здобуття освітнього ступеня магістр  
кваліфікаційна робота містить результати власних досліджень.  
Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на  
відповідне джерело \_\_\_\_\_  
(підпис, ініціали та прізвище здобувача вищої освіти)

Керівник роботи

Ільченко А.В.

(прізвище, ім'я, по батькові)

К.Т.Н., ДОЦЕНТ

(науковий ступінь, вчене звання)

## АНОТАЦІЯ

Субин Л.Ю. Обґрунтування параметрів енергозберігаючої системи охолодження молока. Кваліфікаційна робота на здобуття освітнього ступеня магістра за спеціальністю 208 – Агроінженерія. – Поліський національний університет, Житомир, 2023.

В кваліфікаційній роботі наведені типові схеми охолодження молочної продукції, проводиться аналіз їх переваг і недоліків. На основі проведеного аналізу запропонована енергозберігаюча система охолодження молока на фермі. Проблема акумулювання холоду обумовлена необхідністю економії енергетичних ресурсів. Основними причинами актуальності даної проблеми на сьогодні є великі витрати на генерацію холоду, а також значно дешевший тариф на електроенергію у нічний час.

В роботі подана методика розрахунку кількості акумульованої енергії у вигляді льоду та потужності холодильного обладнання, необхідної для заморожування льоду.

Обґрунтовано оптимальні режими процесу та конструктивні параметри установки для охолодження молока.

**Ключові слова:** установка, молоко, акумулювання холоду, енергозбереження.

## ABSTRACT

Subyn L.Yu. Justification of the parameters of the energy-saving milk cooling system. Qualification for the advanced master's degree in specialty 208 – Agricultural Engineering. – Polissia National University, Zhytomyr, 2023.

Typical cooling schemes for dairy products are given in the qualification work, and their advantages and disadvantages are analyzed. Based on the analysis, an energy-saving milk cooling system on the farm is proposed. The problem of cold accumulation is caused by the need to save energy resources. The main reasons for the relevance of this problem today are the high costs of cold generation, as well as a much cheaper electricity tariff at night.

The paper presents a method for calculating the amount of accumulated energy in the form of ice and the power of refrigeration equipment required for freezing ice.

The optimal process modes and design parameters of the milk cooling installation are substantiated.

**Key words:** installation, milk, cold accumulation, energy saving.

## ЗМІСТ

ВСТУП	4
РОЗДІЛ 1. СУЧАСНИЙ СТАН ТЕХНІЧНИХ ЗАСОБІВ ДЛЯ ОХОЛОДЖЕННЯ МОЛОКА	7
1.1. Аналіз технологічних систем для охолодження молока	7
1.2. Аналіз установок для охолодження молока	8
1.3. Висновки по розділу 1	17
РОЗДІЛ 2. ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ОХОЛОДЖЕННЯ МОЛОКА	18
2.1. Дослідження енергетичних режимів роботи енергозберігаючої системи охолодження молока з використанням природного холоду	18
2.2. Моделювання процесу охолодження молока з використанням природного холоду	20
2.3. Висновки по розділу 2	27
РОЗДІЛ 3. УЗАГАЛЬНЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕННЯ УСТАНОВКИ ДЛЯ ОХОЛОДЖЕННЯ МОЛОКА	28
3.1. Опис установки для охолодження молока	28
3.2. Результати дослідження енергозберігаючої системи охолодження молока	31
3.3. Висновки по розділу 3	33
ВИСНОВКИ	34
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	35

## ВСТУП

Молоко сільськогосподарських тварин – цінний харчовий продукт. Коров'яче молоко містить понад 200 компонентів, найважливішими з яких є легкозасвоювані білки, жири, вуглеводи, мінеральні солі, вітаміни та багато інших речовин, які необхідні для забезпечення нормального росту та життєдіяльності організму людини. Воно використовується для дитячого харчування та як дієтичний та лікувальний продукт при недокрів'ї, туберкульозі, гастриті, отруєння, захворювання печінки, нирок, шлунково-кишкового тракту, а також як захисний фактор для працюючих на підприємствах із шкідливими для здоров'я умовами праці.

Коров'яче молоко є харчовим продуктом, що швидко псується. Зниження його якості при затриманні з очищенням та охолодженням обумовлено розмноженням шкідливих для організму людини бактерій.

«Існуючі традиційні системи охолодження молока на даний час не дозволяють виконувати всі вимоги нових стандартів якості. Одна з основних проблем – тривалість охолодження свіжовидоєного молока, яке складає відповідно до від 2 до 3 годин. За даний термін кількість бактерій зростає в тисячі разів. Таке охолодження не дозволяє зупинити зростання несприятливої мікрофлори, збільшення вмісту токсинів, які виділяють шкідливі мікроорганізми та виключити вплив факторів на якість молока».

[1,2]

«З метою збереження якості молока після доїння його необхідно миттєво охолодити до того, як у ньому почнуть розмножуватися шкідливі для здоров'я бактерії. При використанні технології миттєвого охолодження температура молока від  $+35^{\circ}\text{C}$  до  $+4^{\circ}\text{C}$  знизиться за декілька хвилин і навіть секунд порівняно з 2...3 годинами». [3]

Таким чином, існуючі технології та установки для охолодження молока на даний час не задовольняють вимоги сільськогосподарського виробництва та мають ряд недоліків, а саме: велика металомісткість, низька надійність, висока витрата електроенергії; негативний вплив на довкілля тощо.

Одним із шляхів зниження енерговитрат на охолодження та зберігання молока на фермах та збереження його високої якості є акумуляція холоду та використання енергії льоду, тому організація раціонального витрати холоду водного льоду при охолодженні молока в теплообмінних апаратах акумуляційної дії має велике значення. У зв'язку з зростаючим дефіцитом та подорожчанням енергетичних ресурсів, питання отримання льоду у водольодних акумуляторах з використанням природного холоду набуває великого практичного значення.

**Метою дослідження роботи** є підвищення енергоефективності охолодження молока за рахунок запропонованих режимів роботи устаткування з використанням природного холоду.

**Об'єктом дослідження** є процес охолодження молока з використанням природного холоду.

**Предмет дослідження** – режими роботи обладнання для охолодження молока з використанням природного холоду.

**Завдання дослідження:**

- обґрунтувати актуальність досліджень та можливість підвищення ефективності охолодження молока за рахунок використання природного холоду;

- розробити математичну модель процесу охолодження молока з використанням природного холоду;

- обґрунтувати режими роботи модуля системи охолодження молока, що дозволить скоротити споживання електроенергії.

**Матеріали та методи.** Теоретичні дослідження проводилися з використанням методів математичного моделювання процесів теплообміну робочих середовищ, методів теплотехніки та гідростатики.

В основі розробки лежать дослідження процесу заморожування льоду. Наморожування льоду є дуже енергоємним процесом. На виробництво 1 т водного льоду витрачається близько 90 кВт·год енергії. Тому дуже актуальними при охолодженні молока є розробка та впровадження енергозберігаючих режимів роботи холодильного обладнання при отриманні та витрачанні льоду в акумуляторах із застосуванням природного холоду.

**Публікації:**

**Субин Л.Ю.** Дослідження енергетичних режимів роботи енергозберігаючої системи охолодження молока з використанням природного холоду. Матеріали VII міжнародної науково-практичної конференції «Біоенергетичні системи». 15-17 листопада 2023 р. Житомир: Поліський національний університет, 2023. С.113-116.

**Субин Л.Ю.** Моделювання процесу охолодження молока з використанням природного холоду. Матеріали міжнародної науково-практичної конференції здобувачів вищої освіти та молодих вчених «Інженерні процеси та системи». 14-15 червня 2023 р. Житомир: Поліський національний університет, 2023. с.122-124.

**Субин Л.Ю.** Аналіз технологічних систем охолодження молока. Студентські читання–2023: матеріали науково-практичної конференції науково-педагогічних працівників, докторантів, аспірантів та молодих

вчених факультету інженерії та енергетики. 25 жовтня 2023 р. Житомир: Поліський національний університет, 2023. С. 209-211.

**Обсяг та структура роботи.** Робота складається із вступу, трьох розділів, загальних висновків, списку використаних джерел. Робота викладена на 36 сторінках машинописного тексту, містить 2 таблиці, 11 рисунків, списку використаних джерел з 18 найменування.

# РОЗДІЛ 1. СУЧАСНИЙ СТАН ТЕХНІЧНИХ ЗАСОБІВ ДЛЯ ОХОЛОДЖЕННЯ МОЛОКА

## 1.1. Аналіз технологічних систем для охолодження молока

Підприємства тваринницького комплексу є складною системою, що складається з сукупності взаємопов'язаних елементів, між якими встановлені функціональні зв'язки. Декілька років назад виробники тваринницької продукції не надавали серйозного значення створенню спеціальних систем, що дозволяють оптимізувати управління технологічними процесами на підприємстві, у т. ч. процесом первинної обробки молока, що включає такі основні операції, як очищення, охолодження та проміжне зберігання молока.

Отримання в умовах господарств молока найвищого гатунку є одним із найважливіших умов рентабельності виробництва.

Існує два види охолодження: природне та штучне.

При штучному охолодженні можна забезпечити нормативний процес охолодження та отримати якісний продукт. Недоліком штучного охолодження є низька енергоефективність за рахунок великих витрат енергії.

На охолодження 1 тонни свіжовидоєного молока витрачається 30-35 кВт · год електроенергії [4], а з урахуванням існуючих тенденцій до постійного зросту тарифів на енергію, немаловажним завданням є підвищення енергоефективності установок для охолодження молока.

Також при використанні штучного холоду на фермах важливо враховувати, що електрична мережа не скрізь доступна або наявних електричних потужностей недостатньо для задоволення всіх енергетичних потреб.

«Щоб підвищити енергоефективність процесу охолодження багато фермерів використовують природний холод. Для охолодження та зберігання молока на тваринницьких фермах та комплексах використовуються холодильні установки. Вони являють собою ємності з подвійними стінками з нержавіючої сталі, всередині яких знаходиться молоко, що охолоджується. Зовні ємності мають герметичну обшивку та термоізолюючу сорочку. Між ємністю та обшивкою протікає холодоагент, при використанні технологічної схеми з безпосереднім охолодженням молока, або охолоджувач у вигляді крижаної води. Через теплообмін (металеву стінку) холодоагент або холодоносії відбирає тепло у молока, яке перемішується в ємності спеціальною мішалкою». [1]

На даний час існуючі технології для охолодження молока можна поділити на чотири варіанти:

Перший – використання парокомпресійної холодильної машини з акумуляторами льоду. Охолодження стінок резервуара відбувається крижаною водою. В даному випадку виключається примерзання молока до стінок, і відбувається швидше охолодження, так як холодильна машина включається відразу надходження молока у резервуар-охолоджувач. Крім того, застосування акумулятора холоду дозволяє значно знизити витрати на електроенергію, тому що наморозувати лід можливо і в нічний час, при мінімальних навантаженнях в електромережах, коли вартість електроенергії у 3-4 рази нижча, ніж у денний час. Однак при вторинному заповненні резервуару виникає проблема: при змішуванні теплого та холодного молока змінюються його властивості, що призводять до зниження якості продукту.

Другий – резервуар-охолоджувач з акумулятором холоду, що комплектується проточним охолоджувачем. В даному випадку забезпечується швидке охолодження молока, знімається проблема зміни властивостей при змішуванні теплого та холодного молока.

Третій – використання резервуара-охолоджувача із безпосереднім охолодженням. Недоліком такої системи є примерзання молока до внутрішньої поверхні резервуара, що є допустимим. І для того, щоб молоко не примерзало, включення парокомпресійної холодильної машини відбувається тільки після заповнення резервуара необхідного рівня, щоб забезпечити перемішування молока мішалкою.

Четвертий варіант відрізняється від попередніх тим, що з метою енергозбереження в проточних охолоджувачах, де здійснюється перший ступінь охолодження молока, використовується проточна вода (грунтова або водопровідна), яка надалі може використовуватися для напування тварин чи технологічні потреби. Однак у цьому випадку треба враховувати, що пластинчасті охолоджувачі дуже чутливі до якості води.

В даний час найбільшого поширення набули пластинчасті охолоджувачі. Основні переваги яких: висока ефективність охолодження; малий робочий об'єм; невеликі витрати на придбання та експлуатацію та ін.

## **1.2. Аналіз установок для охолодження молока**

«Створення екологічно безпечного обладнання може значно покращити екологічний стан на господарстві. Однак дане обладнання не повністю відповідає вимогам сільського господарства, оскільки не забезпечує повну економію електроенергії та не захищає сільськогосподарського споживача від аварійних і планових відключень електроенергії та втрат сільськогосподарської продукції». [4-6]



Устаткування для охолодження молока (танк охолоджувач / холодильна установка) призначене для тваринницьких ферм, пунктів прийому та збору молока з метою його зберігання до перевезення до місць подальшої переробки

Вибір об'єму молочного танка та їх кількість залежить від чисельності дійного стада, продуктивності корів та часу зберігання молока.

Холодильна установка може бути укомплектована системою для нагрівання виробничої води (рекуперації) парами холодоагенту, що надходить із компресора в конденсатор. Холодильний агрегат заправляється холодоагентом (температура кипіння при атмосферному тиску - 40,8 ° С).

Танки охолоджувачі виконують у вигляді закритого молочного танка з непрямим охолодженням, такі установки є найпоширенішими на молочних фермах (рис. 1.1).

«Охолодження молока проводиться зрошенням зовнішніх бічних стінок молочної ємності крижаною водою насосом через систему трубопроводів. Молочна ємність встановлена у водяну ванну і знаходиться вище за рівень крижаної води. Охолодження води відбувається за рахунок танення льоду, що утворюється на змійниковому випарнику системи охолодження. Компресорно-конденсатний агрегат встановлюється на фундаменті». [7]

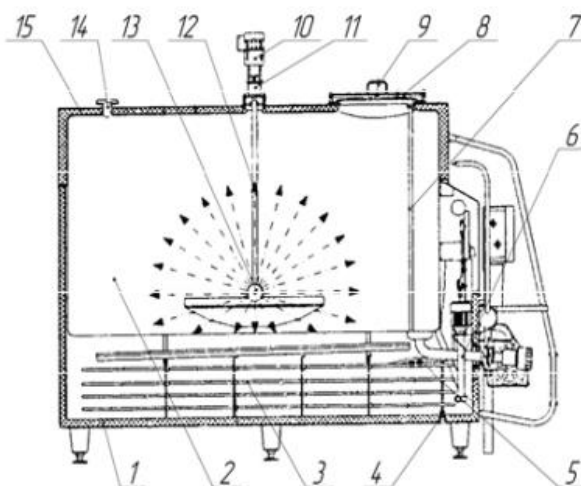


Рисунок. 1.1 - Танк-охолоджувач молока: 1 – ємність холодильного танка (ванна, з тепловою поліуретановою ізоляцією); 2 – ємність для зберігання молока; 3 – змійниковий випарник системи охолодження; 4 – пробка водоскиду та обмеження рівня води; 5 – датчик кількості льоду; 6 – насос крижаної води; 7 – вимірювальна штанга з міліметровою шкалою; 8 – оглядове вікно з відкритою кришкою; 9 – отвір для надходження молока діаметром 50 мм із гумовою пробкою; 10 – мотор-редуктор приводу мішалки; 11 – муфта гідравлічна для введення санітарно-миючого розчину; 12 – мішалка, оснащена пристроями для розбрикування; 13 – головка

розбризкувача; 14 – повітровідвідник; 15 – теплоізоляційна кришка ємності для зберігання молока.

Даний танк охолоджувач має ряд недоліків таких як велике енергоспоживання та ненадійність конструкції.

Найбільш простим способом охолодження свіжовидоєного молока на фермах є охолодження у флягах (рис. 1.2), занурених у басейн із проточною холодною джерельною або водопровідною водою.

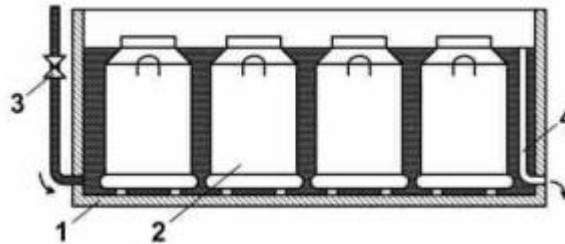


Рисунок 1.2 – Пристрій для охолодження молока у флягах: 1 – басейн; 2 – фляги; 3 – вентиль; 4 – зливна труба

Процес охолодження молока у флягах здійснюється за рахунок передачі теплоти через стінку фляги холодної проточної води, що надходить у нижню частину басейну водопровідної труби. Внаслідок конвекції підігріта вода піднімається догори і витікає з басейну зливною трубою. Недоліками даного способу є низька інтенсивність охолодження, що знижує якість молока, значні витрати ручної праці та охолоджувальної води.

Іншим способом охолодження молока у флягах з використанням природного холоду є подача холодної водопровідної або крижаної води із акумулятора природного холоду через циліндричний занурювальний теплообмінник з механічною мішалкою. Такий охолоджувач складається з основи, на якій кріпляться циліндричний (кільцеподібний) теплообмінник з патрубками для підведення та відведення холодоносія, механічна мішалка з приводом від електродвигуна.

Суттєвим недоліком такого способу охолодження є значні витрати праці на вантажно-розвантажувальні операції.

«Холодильна установка моделі Je-SA/1100 призначена для охолодження молока до температури 2-6 °С». «Заправляється холодильна установка хладоном R404а». [5-6]

Принцип роботи холодильної установки (рис. 1.3) полягає в наступному. Газоподібний холодоагент компресором 4 нагнітається в теплообмінник 16, в якому частина тепла віддається холодній воді, що проходить між пластинами, і далі надходить у конденсатор 14. При тиску газу нижче встановленого 0,14 МПа (R404а) за допомогою барометричного регулятора 15 та мембранного вимикача 13 відключається вентилятор конденсатора, і,

навпаки, при підвищенні тиску в конденсаторі вище встановленого значення, вентилятор включається. Тиск у конденсаторі залежить від температури води, що надходить у теплообміннику.

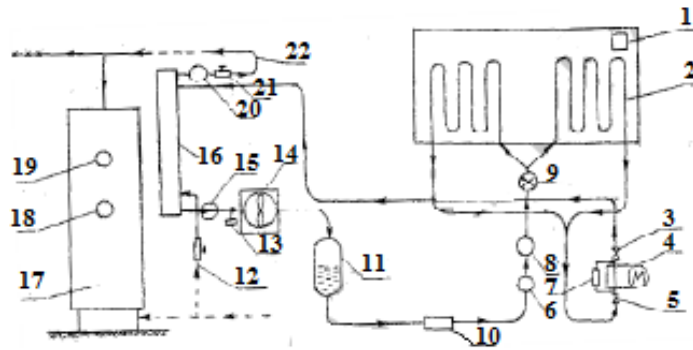


Рисунок 1.3. Принципова схема холодильної установки моделі Je-SA/1100:1 – термостат; 2 – випарник; 3 – нагнітальний вентиль; 4 – компресор; 5 – всмоктувальний вентиль; 6 – регулятор високого та низького тиску; 7 – електромагнітний клапан; 8 – оглядове вікно; 9 – терморегулюючий вентиль; 10 – фільтр-осушувач; 11 – ресивер; 12, 22 – трубопроводи холодної та гарячої води; 13 – мембранний вимикач вентилятора; 14 – конденсатор; 15 – барометричний регулятор конденсатора; 16 – пластинчастий теплообмінник; 17 – накопичувач води; 18 – захисний анод; 19 – термометр; 20 – водяний насос; 21 – вентиль

Конденсатор забезпечує охолодження стислих парів холодоагенту повітрям, яке знаходиться навколо та їх конденсацію. З конденсатора рідкий холодоагент надходить у ресивер 11, фільтр-осушувач 10, де очищається від механічних домішок і зневоднюється, і далі через електромагнітний клапан 7 терморегулюючий вентиль (ТРВ) 9.

Ресивер створює запас рідкого холодоагенту, необхідний для забезпечення рівномірного живлення випарної системи, крім того, він є додатковою ємністю конденсатора, яка запобігає переповненню останнього рідким холодоагентом.

У терморегулюючому вентилі (ТРВ) холодоагент дроселюється, що далі супроводжується зниженням тиску холодоагенту від тиску конденсації до тиску кипіння. Частина рідини, що пройшла через ТРВ, перетворюється в насичену пару, охолоджуючи при цьому решту холодоагенту до температури кипіння, тобто з ТРВ виходить суміш рідини та насиченої пари (волога пара).

«На фермах часто використовують фрегоаторну установку охолодження молока» (рис. 1.4) [7, 8].

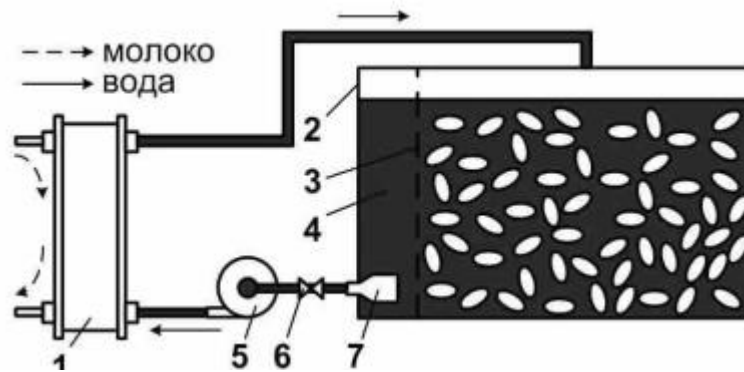


Рисунок 1.4 – Фригаторна установка потокового охолодження молока: 1 – пластинчастий охолоджувач; 2 – фригатор; 3 – фільтр; 4 – секція крижаної води; 5 – насос; 6 – фільтр насоса; 7 – вентиль; 8 – труба повернення води

Перед запуском молока в охолоджувач фригатор завантажують шматками лід і заливають водою до закриття фільтра всмоктуючої труби, далі відкривають вентиль і пускають у роботу насос, а потім подають молоко в охолоджувач. Під дією насоса вода рухається замкнутим циркуляційним контуром: фригатор –насос – охолоджувач – труба з розбризкувачем – фригатор. При цьому крижана вода в результаті теплообміну з молоком через пластини підігрівається в охолоджувачі, а у фригаторі охолоджується за рахунок танення льоду при контакті його з водою, і далі цикл повторюється.

Недолік: значні витрати на заготовку шматкового льоду і завантаження його у фригатор.

«Широкого застосування набула установка для охолодження молока з використанням льдобунту» (рис. 1.5) [9-11].

Під час доїння відфільтроване (проціджене) молоко надходить у молочну ванну, встановлену на терезах. Після зважування насосом воно перекачується через пластинчастий охолоджувач марки ООТ-М у молоковоз для відправки на молочний завод. Для охолодження молока зі свердловини подається артезіанська вода в бак місткістю 1...3 м<sup>3</sup>, звідки нагнітається насосом через реєстр льдобунта в пластинчастий охолоджувач молока, а далі в групові автонапувалки. У реєстрі вода охолоджується до +3...4°С, а в охолоджувачі молока вона нагрівається до +13...14°С.

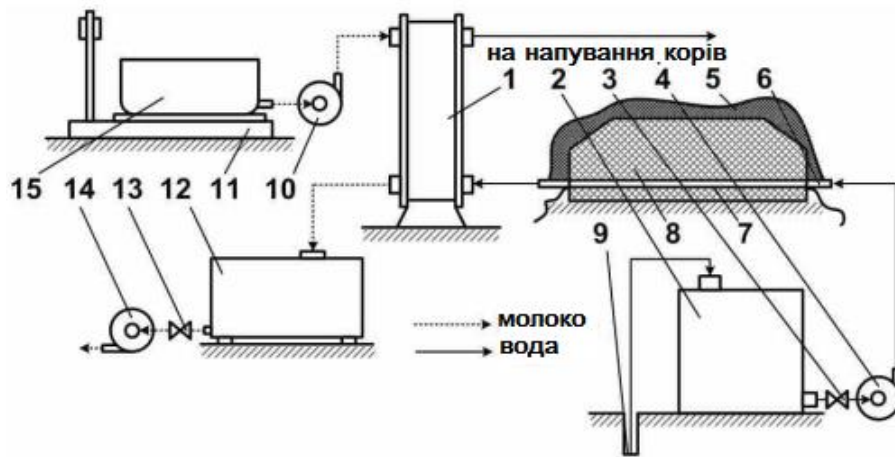


Рисунок 1.5 – Установа з льодобунтом для охолодження молока: 1 – пластинчастий охолоджувач; 2 – бак; 3 – вентиль; 4, 10, 14 – насоси; 5 – шар тирси; 6 – гнучкий рукав; 7 – реєстр; 8 – льодобунт; 9 – свердловина; 11 – ваги; 12 – ємність для зберігання молока; 13 – вентиль; 15 – ванна

До недоліків можна віднести високу металоємність установки, суттєві витрати праці на щорічну теплоізоляцію льодобунту, суттєві перевитрати артезіанської води.

«Наступний варіант з використанням штучного холоду не має резервуара на днищі для крижаної води». За рахунок цього його об'єм зменшується відповідно до рис. 1.6. [8]

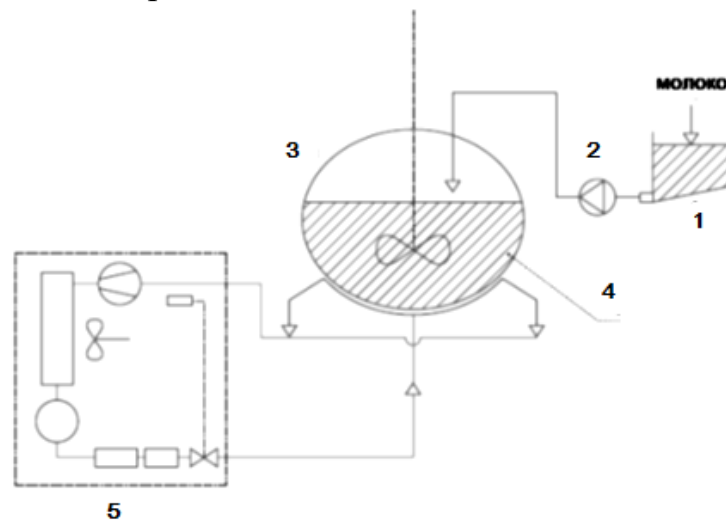


Рисунок 1.6 – Схема закритого баку для прямого охолодження молока: 1 – танк для молока, 2 – насос для молока, 3 – танк для охолодження молока, 4 – випарувальний танк, 5 – конденсаційна установка

Резервуари-охолоджувачі молока – найбільш досконале технологічне обладнання молочних ферм, що забезпечує глибоке охолодження молока та його зберігання в охоложеному вигляді в умовах ферм. Дане обладнання поділяється на резервуари з автономною системою охолодження та

безпосереднім охолодженням. Резервуари-термоси на відміну від резервуарів-охолоджувачів не мають водяних сорочок, що забезпечують циркуляцію рідини, що охолоджує. Вони мають тільки термоізоляцію, що забезпечує зберігання в них охолодженого продукту.

Технологічний процес резервуару-охолоджувача молока складається з наступних стадій: заповнення молочної ванни молоком, охолодження молока з перемішуванням, зберігання молока, випорожнення молочної ванни, промивання та дезінфекція. Управління технологічними процесами може здійснюватися в автоматичному та ручному режимах за допомогою розподільної шафи та шафи управління.

«Резервуар-охолоджувач KRYOS (WestfaliaSurge) (рис. 1.7) призначений для збору, охолодження молока з +35 до +4 °С його подальшого зберігання при температурі +4...+6 °С до передачі на переробне підприємство». [9]

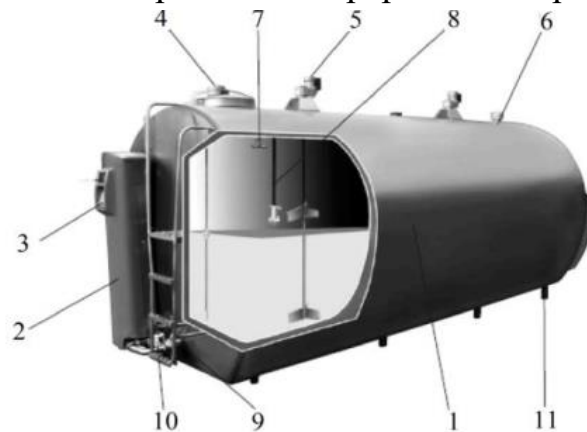


Рисунок 1.7. Конструктивно-технологічна схема резервуару-охолоджувача молока KRYOS:

1 – резервуар; 2 – пристрій управління та промивання; 3 – модуль керування з електронним індикатором рівня наповнення; 4 – заливна горловина з кришкою; 5 – двигун перемішуючого механізму; 6 – вентиляційний отвір; 7 – голівка, що розбризкує; 8 – розбризкуюча голівка; 9 – зливальний клапан; 10 – злив промивної води; 11 – регульовані опори

«Резервуар-охолоджувач молока Г6-ОРМ-2500 (рис. 1.8) має термоізоляцію, що забезпечує сталість температури (підвищення температури холодного молока при відключенні електрики) не більше 1°С за 4 години. Холодильні агрегати, що встановлюються на резервуарах охолоджувачах молока, працюють на холодоагенті R22 (фреон). Резервуар-охолоджувач молока має автоматичну систему промивання після випорожнення від молока». [10]

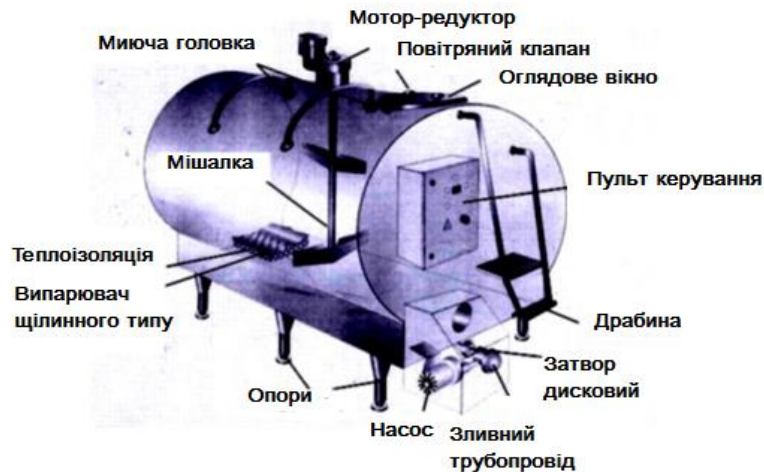


Рисунок 1.8. Складові елементи резервуару-охолоджувача молока Г6-ОРМ-2500

Установка охолодження молока УНОМ-1200 (рис. 1.9) відкритого типу, що працює за принципами безпосереднього та проміжного охолодження. Установка є стаціонарною та призначена для збору, інтенсивного охолодження та зберігання молока при зниженій температурі на молочних фермах та молокопереробних підприємствах при температурі навколишнього повітря від +5 до +40 °С. Установка складається з ємності з двостінною оболонкою, міжстінний простір якої заповнено високощільним пінополіуретаном.

У порівнянні з іншими охолоджувальними системами принцип безпосереднього (прямого) охолодження забезпечує високу ефективність охолоджувальної технології у поєднанні з мінімальним споживанням електричної енергії.

«Установки безпосереднього охолодження як відкритого, і закритого типів, допускають змішування молока різних партій, тобто в резервуар, де вже частково заповнений охолодженим молоком, може подаватися парне молоко, одержуване під час другого доїння. Критерієм, що обмежує змішування молока різних партій, є тривалість охолодження до +4 °С молока при другому доїнні, що не повинно перевищувати 1 години. Грамотний підбір місткості охолоджувача молока та холодопродуктивності його компресорної установки дозволяє заповнювати молочний танк до повного завантаження та відповідно знижувати витрати на транспортування молока до молокопереробних підприємств». [11-12]



Рисунок 1.9. Установка охолодження молока УНОМ-1200

«За кордоном також проводяться роботи з удосконалення систем, що використовують природний холод. Розробляються компресори та системи автоматизації, що працюють на екологічно безпечних вуглеводневих холодоагентах. Вони розробляються європейськими фірмами Coneland, a'Unite Hermetique» (Франція), а також фірми «Maneurop», «Dorin», «Butzer», «GEA Farm Technologies» (Німеччина), Frigomilk (Італія). Створення екологічно безпечного обладнання може значно покращити екологічну обстановку, однак воно не повністю відповідає вимогам сільського господарства, тому що не забезпечує економії електроенергії, не захищає сільськогосподарського споживача від аварійних та планових відключень електроенергії та втрат сільськогосподарської продукції». [10-14]

«На певну увагу заслуговує створення та використання екологічно безпечного обладнання – теплових насосів, що використовують «скидне» тепло корівників та інших сільськогосподарських об'єктів та виробляючих технологічний холод, одним із основних недоліків якого є висока вартість. Такі установки розробляють фірми «Аеро-Пласт» «Аіровель» «Де Діфріх» «Еліз» і «Фрімер» (Франція). Подібне енергозберігаюче обладнання, а також безсальникові та герметичні компресори, що розробляються фірмами «Хітачі» (Японія), «Сіменс» та «Сумак» (Німеччина) можуть встановлюватись на резервуарах – охолоджувачах молока типу РМ/1В-2200 (фірма «RASSO» (Бельгія)) та акумуляційних установках для охолодження молока фірми "Данфоснордберг" (Данія). Створенням спеціального обладнання, в тому числі для подібних установок займаються фірми «Сіат» «Леборн» і «Сортель» (Франція) а також «Кор'єр» «Вестингауз» (США) і «МКТ-ханкія» (Фінляндія)». [15-17]

Велику увагу зарубіжними фірмами приділяється розвитку систем, що використовують природний холод у вигляді намороженого льоду. Таку систему створено та досліджено шведською фірмою «Платен-Мунтерос



рефрижератинг систем». За результатами досліджень було споруджено охолоджувальну систему, що використовує крижаний акумулятор холоду із загальним тепловим навантаженням 704 кВт і об'ємом льоду 12750 м<sup>3</sup>, що дозволило значно знизити витрати електроенергії.

### **1.3. Висновки по розділу 1**

Таким чином, можна зробити висновок про те, що основними недоліками установок природного холоду є: велика металомісткість, низький рівень уніфікації; обмежена холодопродуктивність через малу поверхню контакту атмосферного повітря з холодоносієм, невисокою ефективністю використання випарного охолодження установок, малий діапазон робочих температур охолоджувачів, а ефективна робота таких установок досягається тільки в холодну пору року.

## РОЗДІЛ 2. ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ОХОЛОДЖЕННЯ МОЛОКА

### 2.1. Дослідження енергетичних режимів роботи енергозберігаючої системи охолодження молока з використанням природного холоду

У традиційних системах охолодження молока із застосуванням штучного холоду (або парокompресійних холодильних машин) проводиться заморожування льоду. «Необхідний його об'єм визначається кількістю молока, яке потрібно охолодити і завжди витримується співвідношення 1:3». [3, 7, 10] Так, для охолодження 1 тонни молока необхідно заморозити 333 кг льоду, на що потрібно витратити порядком 25...30 кВт · год електроенергії.

«Кількісна оцінка енергетичних потоків енергозберігаючої технологічної лінії виконана на основі рівнянь енергетичного балансу». [18]

До першої групи віднесено теплову енергію  $\sum Q_1$ , що знаходиться в молоці, яке надходить на технологічну лінію [7, 8]:

$$\sum Q_1 = \sum Q_{1\text{рт}} + \sum Q_{1\text{вт}}, \quad (2.1)$$

$$\sum Q_1 = \sum Q_{1\text{рх}} + \sum Q_{1\text{вх}}, \quad (2.2)$$

де  $\sum Q_{1\text{рт}}$  та  $\sum Q_{1\text{вт}}$  – теплова енергія, що витрачається відповідно у теплу та холодну пору року;  $\sum Q_{1\text{рх}}$  та  $\sum Q_{1\text{вх}}$  – втрати енергії при охолодженні молока відповідно у теплу та холодну пору року.

«У другу групу  $\sum Q_2$  включені енергетичні потоки ланок технологічної лінії (насоси рідин, що перекачують, вакуумний насос), енергетичні режими роботи яких практично не змінюються протягом роки і не впливають на енергетичний баланс»: [7, 8]

$$\sum Q_2 = \sum Q_{2\text{р}} + \sum Q_{2\text{в}}, \quad (2.3)$$

де  $\sum Q_{2\text{р}}$  – енергія, що витрачається на виконання технологічного процесу: виведення молока з вакуумної магістралі, переміщення молока по трубопроводах, переміщення технологічної води під час промивання обладнання та системи в цілому;  $\sum Q_{2\text{в}}$  – втрати енергії в процесі перетворення її з електричної в механічну.

«До третьої групи віднесена енергія  $\sum Q_3$ , що надходить з охолоджувачем (водою)»: [7, 8]

$$\sum Q_3 = \sum Q_{3\text{рх}} + \sum Q_{3\text{вх}}, \quad (2.4)$$

де  $\sum Q_{3\text{рх}}$  – теплова енергія, що витрачається на охолодження молока холодоносієм;  $\sum Q_{3\text{вх}}$  – втрати енергії при охолодженні молока холодоносієм.

«До четвертої групи віднесено енергію  $\sum Q_4$  насоса холодоносія ПКХМ (води)»: [7, 8]

$$\sum Q_4 = \sum Q_{4\text{пх}} + \sum Q_{4\text{вп}}, \quad (2.5)$$

де  $\sum Q_{4\text{пх}}$  – енергія, що витрачається на переміщення холодоносія;  $\sum Q_{4\text{вп}}$  – втрати енергії в процесі перетворення її з електричної на механічну.

До п'ятої групи віднесено енергію  $\sum Q_5$ , що надходить із зовнішнім повітрям:

$$\sum Q_5 = \sum Q_{5\text{зп}} + \sum Q_{5\text{вп}}, \quad (2.6)$$

де  $\sum Q_{5\text{зп}}$  – теплова енергія, що надходить із зовнішнім повітрям;  $\sum Q_{5\text{вп}}$  – втрати енергії під час охолодження зовнішнього повітрям.

До шостої групи віднесено енергію  $\sum Q_6$  вентилятора:

$$\sum Q_6 = \sum Q_{6\text{зп}} + \sum Q_{6\text{вп}}, \quad (2.7)$$

де  $\sum Q_{6\text{зп}}$  – енергія, що витрачається на переміщення повітряної маси;  $\sum Q_{6\text{вп}}$  – втрати енергії в процесі перетворення її з електричної на механічну.

Рівняння енергетичного балансу енергозберігаючої технологічної лінії для пори року, коли використання природного холоду є ефективним:

$$\sum Q_1 + \sum Q_2 + \sum Q_3 + \sum Q_4 + \sum Q_5 + \sum Q_6 = \sum Q_{1\text{рх}} + \sum Q_{2\text{р}} + \sum Q_{3\text{рх}} + \sum Q_{4\text{пх}} + \sum Q_{5\text{зп}} + \sum Q_{6\text{зп}} + \sum Q_{1\text{вх}} + \sum Q_{2\text{в}} + \sum Q_{3\text{вх}} + \sum Q_{4\text{вп}} + \sum Q_{5\text{вп}} + \sum Q_{6\text{зп}}, \quad (2.8)$$

Схема енергетичних потоків представлена на рисунку 2.1.

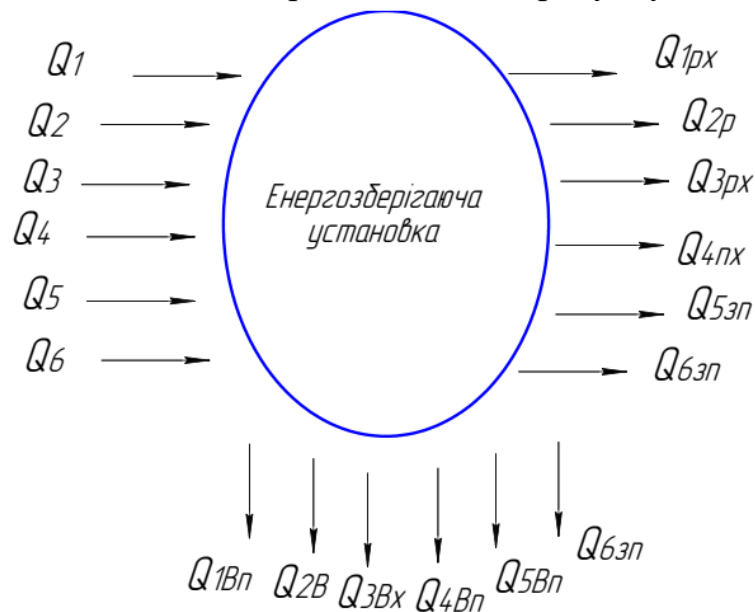


Рисунок 2.1 – Схема енергетичних потоків технологічної лінії охолодження молока з використанням природного холоду

## 2.2. Моделювання процесу охолодження молока з використанням природного холоду

Кількість молока, отриманого за  $i$ -й надій, яке необхідно охолодити, є випадковою величиною. Воно визначається як:

$$M_i = m[M_i^t], \quad (2.9)$$

де  $M_i$  – розрахункова кількість молока, яку потрібно охолодити за  $i$ -го доїння, кг;

$m[M_i^t]$  – оцінка математичного очікування кількості молока, яке потрібно охолодити за  $i$ -е доїння за період  $T$ , кг.

Враховуючи, що все тепло від рідини, що охолоджується, повинно передатися воді в акумуляторі холоду, потрібну масу води в акумуляторі холоду розраховуємо відповідно до формули, кг:

$$m_B = m_M \cdot \frac{c}{c_B} \cdot \frac{\Delta t_M}{\Delta t_B}, \quad (2.10)$$

де  $m_B$  і  $m_M$  - відповідно маса води і молока в акумуляторі холоду, кг;

$c$  – теплоємність молока, Дж/(кг·К);

$c_B$  – теплоємність води, Дж/(кг·К);

$\Delta t_M$  – зміна температури молока в процесі охолодження водою, К;

$\Delta t_B$  - зміна температури води за рахунок тепла, що надходить від молока, К.

Даному випадку враховуємо, що молоко необхідно охолодити з +37 до 4°C. Тому  $\Delta t_B = 33$ К. Нагрів води приймаємо рівним  $\Delta t_B = 2 \dots 6$ К.

Тоді нагрів води буде:

$$\frac{\Delta t_M}{\Delta t_B} = 16,5 \dots 5,5, \quad (2.11)$$

Середню теплоємність води приймаємо рівною Дж/(кг·К), а середня теплоємність молока в даному випадку становитиме Дж/(кг·К).

Співвідношення теплоємності молока до води буде мати такий вигляд відповідно до формули:

$$\frac{c}{c_B} = 0,932, \quad (2.12)$$

Маса води в акумуляторі холоду відповідно до формули (2.10) буде:

$$m_B = 5 \text{ кг} \cdot 0,932 \cdot (16,5 \dots 5,5) = (77 \dots 26) \text{ кг}$$

Об'єм акумулятора холоду у відповідності з формулою має вигляд, м<sup>3</sup>:

$$V_x = \frac{m_B}{\rho_B}, \quad (2.13)$$

$\rho_B$  – густина води, кг/м<sup>3</sup>, вибираємо 998 кг/м<sup>3</sup> при 20°C.

Об'єм акумулятора рахується у відповідності з формулою (2.13):

$$V_x = \frac{77 \dots 26}{998} = 0,078 \dots 0,027 \text{ м}^3. \quad (2.14)$$

Діаметр акумулятора холоду, якщо рахувати його рівним висоті розраховується за формулою:

$$d_x = h_x = \sqrt[3]{\frac{4}{\pi} V_x} = \sqrt[3]{0,0987 \dots 0,033} = 0,47 \dots 0,33 \text{ м}. \quad (2.15)$$

Теплове навантаження від води вважатимемо рівною тепловому навантаженню від води молока, так як вода, що охолодила молоко, повертається в акумулятор холоду. Теплове навантаження від води розсіюється в атмосферу через радіатор. Тепловий баланс від теплових навантажень має вигляд відповідно до форми:

$$Q_m = Q_v + Q_p, \quad (2.16)$$

Визначаємо значення  $Q_v$  і перевіряємо правильність даного рівняння, порівнюємо отримані дані з  $Q_m$  у відповідності з формулою:

$$Q_v = m_v \cdot c_v \cdot \Delta t_v = (78 \dots 27) \cdot 4182 \cdot (2 \dots 6) = 644 \text{ кДж}, \quad (2.17)$$

Знаходимо потужність акумулятора холоду. Для цього потрібно знати тривалість акумуляції холоду. Так як, тривалість ночі змінюється в залежності від пори року, і наша система працює (акумулює холод) у нічний час, вибираємо тривалість ночі в залежно від періоду часу (для літнього періоду та зимового періоду часу). За даними [12] влітку тривалість ночі становить  $\tau_{\text{літ}} = 8 \text{ год} = 28800 \text{ с}$ , а в зимовий час  $\tau_{\text{зим}} = 13 \text{ год} = 46800 \text{ с}$  маючи час тривалості ночі, знаходимо потужність акумулятора холоду для літнього та зимового періоду відповідно до формули:

$$P_{\text{Хл}} = \frac{Q_v}{\tau_{\text{літ}}}, \quad (2.18)$$

$$P_{\text{Хз}} = \frac{Q_v}{\tau_{\text{зим}}}, \quad (2.19)$$

Отже, за розрахунками  $P_{\text{Хл}} = 22,37 \text{ Вт}$ ,  $P_{\text{Хз}} = 13,77 \text{ Вт}$ .

Тепер, розраховуємо площу теплообмінної поверхні зміювика у відповідно до формули:

$$P_3 = \frac{P_x}{k_3 \Delta t_v}, \quad (2.20)$$

де  $P_x$  – потужність акумулятора холоду для літнього періоду;

$\Delta t_v$  – перепад температури води, в середньому беремо  $2^\circ\text{C}$ .

$k_3$  – коефіцієнт теплопередачі стінки зміювика, визначаємо у відповідності з формулою,  $\text{Вт}/(\text{м}^2\text{К})$ :

$$k_3 = \frac{1}{\left(\frac{1}{\alpha_{31}} + \frac{\delta_{31}}{\lambda_{31}} + \frac{1}{\alpha_{32}}\right)}, \quad (2.21)$$

де  $\alpha_{31}$  – коефіцієнт тепловіддачі від етиленгліколю до внутрішньої стінки зміювика, Вт/м<sup>2</sup>·К;

$\alpha_{32}$  – коефіцієнт тепловіддачі від стінки до води при природної конвекції, Вт/м<sup>2</sup>·К;

$\delta_{31}$  – товщина стінки зміювика, м;

$\lambda_{31}$  – теплопровідність стінки зміювика, Вт/(м·К).

Середнє значення коефіцієнта тепловіддачі поверхнею стінки знаходимо відповідно до формули, (Вт/м<sup>2</sup>·К).

$$\alpha_{31} = N_u \cdot \frac{\lambda_e}{d_B}, \quad (2.22)$$

«Для умов  $Pr = 0,6 \dots 2500$  і  $Re = 10^4 \dots 5 \cdot 10^6$  приймаємо і розраховуємо значення  $N_u$  для вимушеної конвекції у відповідності з формулою»: [7, 10, 11]

$$N_u = 0.021 Re^{0.8} \cdot Pr \left( \frac{Pr_e}{Pr_{ст}} \right)^{0.25}, \quad (2.23)$$

Коли відношення  $\frac{l}{d} > 50$ , відповідно число Прант для етиленгліколю дорівнює 1:

$$\frac{Pr_e}{Pr_{ст}} \approx 1, \quad (2.24)$$

«Число  $Re$  Рейнольдса розраховуємо відповідно за формулою»: [7-8]

$$Re = \frac{\omega \cdot d_B}{\nu_k}, \quad (2.25)$$

де  $d_B$  – внутрішній діаметр трубопровода зміювика,  $d = 0,01$  м;

$\nu_k$  – кінематична в'язкість етиленгліколю,  $\nu_k = 4,6 \cdot 10^{-6}$  м<sup>2</sup>/с;

$\omega$  – швидкість протікання етиленгліколю по трубопроводу у відповідності з формулою має вигляд, м/с:

$$\omega = \frac{G}{F} = \frac{0.00015277}{\frac{\pi d^2}{4}} = 1,946 \text{ м/с}, \quad (2.26)$$

Знаходимо число Рейнольдса у відповідності з формулою:

$$Re = \frac{1,94 \cdot 0,01}{4,6 \cdot 10^{-6}} = 4217.$$

Знаходимо число Прандтля відповідно до формули:

$$Pr = \frac{c_e \rho_e \nu_e}{\lambda_e}, \quad (2.27)$$

де  $c_e$  – теплоємність етиленгліколю,  $c_e = 3620$  Дж/(кг·К);

$\rho_e$  – густина етиленгліколю,  $\rho_e = 1055$  кг/м<sup>3</sup>;

$\nu_e$  – кінематична в'язкість етиленгліколю,  $\nu_e = 4,6 \cdot 10^{-6}$  м<sup>2</sup>/с.

$\lambda_e$  – теплопровідність етиленгліколю,  $\lambda_e = 0,47$  Вт/(м·К).

Число Нуссельта для вимушеної конвекції у відповідності з формулою 2.23 буде:

$$N_u = 0.0214217^{0.8} \cdot 37,78^{0.4} = 79,145.$$

Коефіцієнт тепловіддачі від етиленгліколю до внутрішньої стінки зміювика у відповідності з формулою 2.22 розраховується:

$$\alpha_{31} = 79,145 \cdot \frac{0,47}{0,04} = 3719 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К}.$$

Коефіцієнт тепловіддачі води для випадку природної конвенції вздовж стінки можна визначити за наступною формулою:

$$\alpha_{32} = N_u \cdot \frac{\lambda_B}{d_H}, \quad (2.28)$$

Коефіцієнт тепловіддачі в умовах природної конвенції розраховують у відповідності з формулою:

$$N_u = B \cdot (G_r \cdot P_r)^n \left( \frac{P_{rB}}{P_{rCT}} \right)^{0.25}, \quad (2.29)$$

Значення коефіцієнту  $B$  і показників степеня  $n$  для вертикальної і горизонтальної поверхню в залежності від перетворення  $G_r \cdot P_r$  [10,11] наведені у відповідності з таблицею 2.1:

Таблиця 2.1. – Значення коефіцієнта  $B$  і показників степеня  $n$

Значення	Вертикальна поверхня		Горизонтальна поверхня
	$10^3$ - $10^9$	$>10^9$	
$G_r \cdot P_r$	$10^3$ - $10^9$	$>10^9$	$10^3$ - $10^8$
$B$	0,77	0,15	0,5
$n$	1/4	1/3	1/4

Спочатку знаходимо число Грасгофа відповідно до формули, для визначення значення коефіцієнта та показника ступеня:

$$G_r = \frac{g\beta_B(t_B - t_{CT})d_3^2}{\nu_B^2}, \quad (2.30)$$

де  $g$  – прискорення вільного падіння,  $g = 9,81 \text{ м/с}^2$ .

$d_3$  – зовнішній діаметр зміювика, його приймаємо  $d_3 = 0,015 \text{ м}$ .

$\nu_B$  – кінематична в'язкість води,  $\nu_B = 1,79 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ .

Температурний напір приймаємо:  $t_H = t_B - t_{CT}$ ;

Температурний коефіцієнт об'ємного розширення води знаходимо у відповідності з формулою:

$$\beta_B = \frac{1}{t_H + 273,15}, \quad (2.31)$$

За розрахунками  $\beta_B = 0,00364$ .

Знаходимо число Грасгофа у відповідності з формулою 2.30:

$$G_r = \frac{9,81(0,00368 \cdot 2) \cdot 0,012^3}{(1,79 \cdot 10^{-6})^2} = 38126.$$

Знаходимо число Прандтля у відповідності з формулою:

$$P_r = \frac{4182 \cdot 1000,43 \cdot 1,62 \cdot 10^{-6}}{0,6} = 11,4.$$

Для визначення значення коефіцієнта  $B$  та показника степеня  $n$  виробляємо та отримуємо значення  $(G_r \cdot P_r) = 38126 \cdot 11,4 = 430813,5$ .

Це значення знаходиться в межах горизонтальної поверхні (II), тому приймаємо значення коефіцієнта  $B=0,5$  а степінь  $n = 1/4$ .

Знаходимо число Нуссельта у відповідності з формулою:

$$Nu = 0,5 \cdot (38126 \cdot 11,3)^{\frac{1}{4}} \cdot 1 = 12,8.$$

Розраховуємо коефіцієнт тепловіддачі від стінки до води при природній конвекції відповідно до формули (2.28):

$$\alpha_{32} = 12,8 \cdot \frac{0,6}{0,012} = 640 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}).$$

Коефіцієнт теплопередачі стінки зміювика визначаємо у відповідності з формулою:

$$k_3 = \frac{1}{\left(\frac{1}{3719} + \frac{0,01}{402} + \frac{1}{640}\right)} = 545,4 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}).$$

Площа теплообмінника зміювика розраховуємо у відповідності з формулою:

$$P_3 = \frac{22,37}{545,4 \dots (2 \dots 3)} = 0,02 \dots 0,0006 \text{ м}^2.$$

Вибираємо потужність акумулятора холоду для літнього періоду, так як він більший, беремо із запасом.

### ***Розрахунок випарника***

Розраховуємо площу випарника відповідно до формули:

$$F_{\text{рад}} = \frac{Q_{\text{м}}}{Q_{\text{рад}}}, \quad (2.32)$$

де  $Q_{\text{м}}$  – теплове навантаження від молока,

$Q_{\text{рад}}$  – теплове навантаження на випарник, розраховується відповідно з формулою:

$$Q_{\text{рад}} = Q_{\text{вип}} \tau \cdot 3600, \quad (2.33)$$

де  $Q_{\text{вип}}$  – ефективне випромінювання,  $Q_{\text{вип}} = 50 \dots 150 \text{ Вт}/\text{м}^2$ .

$\tau$  – тривалість ночі, для літа складає  $\tau_{\text{літ}} = 8$  год, а для зими  $\tau_{\text{зим}} = 13$  год.

Визначаємо теплове навантаження на випарник у відповідності з формулою:

$$Q_{\text{рад}} = (50 \dots 150) \cdot 28800 = 1440 \dots 4320 \text{ кДж}/\text{м}^2 \text{ (для літа)}$$

$$Q_{\text{рад}} = (50 \dots 150) \cdot 46800 = 2340 \dots 7020 \text{ кДж}/\text{м}^2 \text{ (для літа)}$$

Знаходимо площу випарник у відповідності з формулою:



$$F_{\text{рад}} = \frac{643}{1440 \dots 4320} = 0,04467 \dots 0,1488 \text{ м}^2 \text{ (для літа)}$$

$$F_{\text{рад}} = \frac{643}{2340 \dots 7020} = 0,0276 \dots 0,091 \text{ м}^2 \text{ (для зими)}.$$

Вибираємо найбільшу площу із розрахунків, для охолодження  $F_{\text{рад}} = 5$  л молока, з тепловим навантаженням  $Q_M = 643$  кДж.

Кількість холоду, необхідна для охолодження очікуваного за  $i$ -е доїння молока, визначається виразом:

Кількість холоду, яка необхідна для охолодження очікуваного за  $i$ -го доїння молока, визначається виразом:

$$P_i = \theta \cdot m[M_i^t] \cdot c(t_{2M} - t_{1M}) - P_e, \quad (2.34)$$

де  $P_i$  – кількість холоду, яка має бути акумульована для охолодження молока, що надійшло за  $i$ -е доїння, кВт · год.;  $\theta$  – коефіцієнт втрат;  $c$  – теплоємність молока, кВт·год/кг·град.;  $t_2, t_1$  – початкова та кінцева температура молока, °С;

$P_e$  – кількість природного холоду, що надійшло за цикл охолодження, кВт·ч.

Розрахункова кількість електроенергії  $E$ , необхідна для охолодження, одержаного за  $i$ -е доїння молока, складе:

$$E = \frac{a\theta \cdot m[M_i^t] \cdot c \cdot \Delta t}{\epsilon}, \quad (2.35)$$

де  $a$  – коефіцієнт запасу;  $\Delta t$  – діапазон температури охолодження молока, °С;  $\epsilon$  – холодильний коефіцієнт.

Енергетичний баланс акумуляційної холодильної установки з використанням природного холоду описується рівнянням.

$$\begin{cases} \sum(P_0; P_{\text{ком}}) = \sum(P_{\text{конд}}; P''_{\text{ком}}; P_e) \\ P_{\text{ком}} = \sum(P'_{\text{ком}}; P''_{\text{ком}}); \\ P_{\text{конд}} = \sum(P_0; P''_{\text{конд}}) \end{cases}, \quad (2.36)$$

де  $P_0$  – енергія, що надходить від охолоджуваного середовища, кВт · год;  $P_{\text{ком}}$  – енергія, що надходить в систему і витрачається компресором на здійснення термодинамічного циклу та подолання об'ємних і механічних втрат, кВт · год;  $P_{\text{конд}}$  – енергетичне навантаження на конденсатор, кВт · год;

$P'_{\text{ком}}$  – енергія на здійснення термодинамічного циклу, кВт·год;  $P''_{\text{ком}}$  – енергія, витрачається компресором на подолання об'ємних та механічних втрат, кВт·год;  $P_e$  – енергетичне навантаження на приймач природного холоду, кВт·год.

Рівняння енергетичного балансу описується рівнянням:

$$P_0 = M \cdot c \cdot (t_1 - t_2), \quad (2.37)$$

де  $M$  – охолоджувана кількість молока, кг;  $c$  – теплоємність молока, кВт·год/кг·град.

Інші складові рівняння (2.36) розраховуються за формулами:

$$P'_{\text{ком}} = \frac{P_0}{\epsilon_{\text{мак}}}, \quad (2.38)$$

де  $\epsilon_{\text{мак}}$  – максимальний (теоретичний) холодильний коефіцієнт;

$$\epsilon_{\text{мак}} = \frac{T_0}{T_k - T_0}, \quad (2.39)$$

де  $T_0$ ,  $T_k$  – абсолютні температури кипіння і конденсації холодоагента, К.

$$P_{\text{ком}} = \frac{P_0}{\epsilon}, \quad (2.40)$$

$$P_e = P_0 \text{ (при } P_{\text{конд}} = 0). \quad (2.41)$$

Для заморожування льоду, необхідного для охолодження  $M$  кількості молока в акумуляторі холоду водольодного типу джерелом штучного холоду, необхідно витратити кількість електроенергії, яка визначається виразом:

$$E = \frac{P_i \cdot l}{\epsilon}, \quad (2.42)$$

де  $E$  – кількість електроенергії, необхідна для наморозування льоду в акумуляторі в розрахунковому режимі, кВт · год;  $l$  – коефіцієнт втрат при наморозуванні льоду;

$P_i$  - теплова енергія, необхідна для охолодження молока, що надійшло за  $i$ -е доїння, кВт·год.

Тривалість циклу наморозування льоду для охолодження молока, що надійшло за  $i$ -е доїння, визначається за виразом:

$$T_i = \frac{P_i \cdot l}{Q}; \quad (2.43)$$

де  $T_i$  – тривалість циклу заморожування льоду для охолодження молока, що надійшло за  $i$ -е доїння, год;  $Q$  – холодопродуктивність холодильної машини, кВт.

Величина  $T_i$  може бути використана при розрахунку акумулюючої здатності акумуляційної комбінованої холодильної машини. Кількість молока  $M_i$ , яке може бути охолоджено на  $30^\circ\text{C}$  1 тонної водної криги, визначається за виразом:

$$M_i = \frac{K \cdot \tau}{c \cdot (t_1 - t_2)} = \frac{1 \cdot 92}{1,09 \cdot 30} = 2,8 \text{ т} \quad (2.44)$$

де  $K$  – кількість льоду, т;  $\tau=92$  – прихована теплота фазового переходу для водного льоду, кВт·год/т;  $c=1,09$  – теплоємність незбираного молока, кВт·ч/т·град.

### 2.3. Висновки по розділу 2

В акумуляторі холоду розраховувалися такі параметри, як маса акумульованої води в залежності від маси рідини, що охолоджується, теплове навантаження від води, потужність акумулятора холоду для літнього та зимового періоду, площа теплообмінної поверхні зміювика – водостиленгліколь, коефіцієнт теплопередачі стінки зміювика.

При розрахунку випарника з використанням теплового випромінювання в навколишній простір, розраховувалися такі параметри, як тепло яке відведене від випарника, площа випромінюючої поверхні, питомий потік ефективного випромінювання.

## РОЗДІЛ 3. УЗАГАЛЬНЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕННЯ УСТАНОВКИ ДЛЯ ОХОЛОДЖЕННЯ МОЛОКА

### 3.1. Опис установки для охолодження молока

На рис. 3.1 представлена схема з використанням комбінованого акумулятора водоохолодного холоду типу у варіанті зовнішньої установки.

У теплоізольованому водокрижаному акумуляторі холоду 1 розташовується випарник 14, виконаний у вигляді решітки труб з ребрами, розміщеним у воді. На його поверхні наморожується лід. На корпусі льодоакумулятора кріпиться конденсатор 2, компресор 3. Повітродувка 5 подає зовнішнє повітря розпилювача 6. Повітря, піднімаючись нагору, інтенсивно переміщує воду, сприяючи її охолодженню.

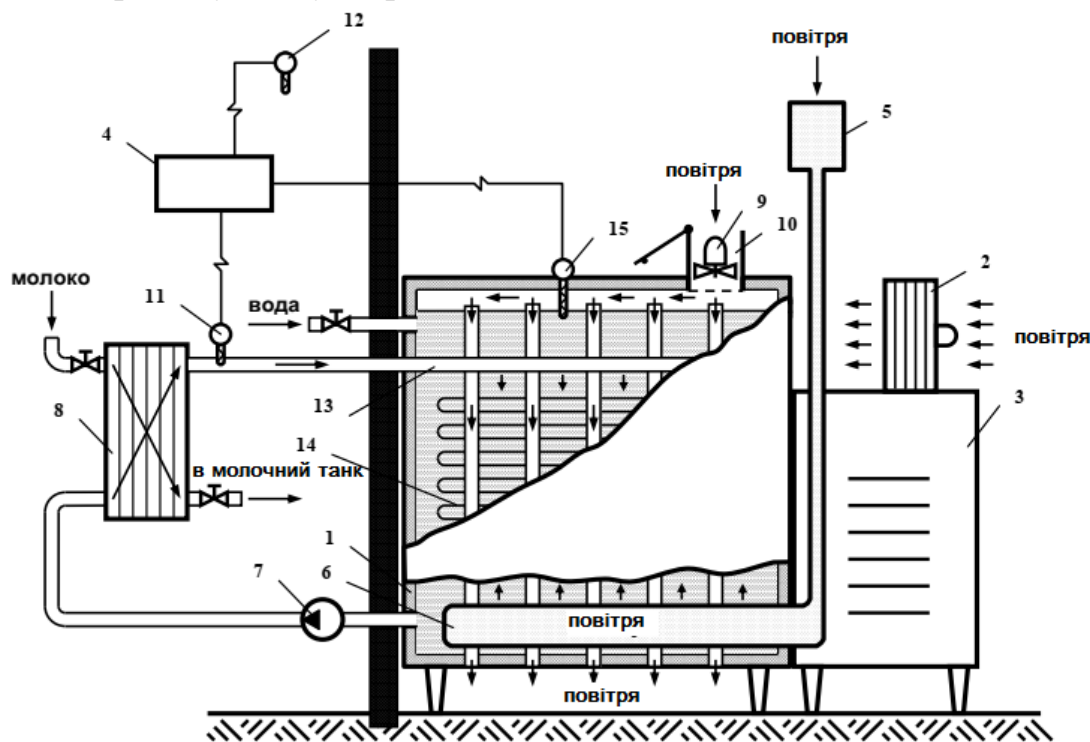


Рисунок. 3.1. Принципова схема для отримання крижаної води з використанням акумулятора льоду зовнішньої установки: 1- водокрижаний акумулятор холоду; 2 – конденсатор; 3 – компресор; 4 – пульт управління; 5 – повітродувка; 6 – розпилювач; 7 – насос холодоносія; 8 – теплообмінник для молока; 9 – вентилятор; 10 – повітряний люк; 11 – датчик тиску; 12 – датчик температури зовнішнього повітря; 13 – розподільна труба; 14 – випарник; 15 – датчик температури холодоносія

Насос охолоджувача 7 подає крижану воду в теплообмінник для молока 8, розташований у виробничому приміщенні, а нагріта вода подається в акумулятор холоду через 1 розподільну трубу 13.

Зовнішнє повітря в холодну пору року через відкритий люк 10 з вентилятором 9 подається в льодоакумулятор 1 з комбінованими трубами випарника 14, охолоджує воду і заморожує лід на поверхні труб і ребрах комбінованого випарника 14.

Повітря виходить з льодоакумулятора 1 через його нижню частину. Пульт управління 4, електрично з'єднаний з датчиками тиску 11 зовнішнього повітря 12 температури 15 і товщини льоду здійснює управління холодильним обладнанням всьому діапазоні температур зовнішнього повітря.

На рис. 3.2 представлений варіант функціональної схеми енергозберігаючої системи охолодження молока з акумуляцією холоду зі встановлення водокрижаного акумулятора всередині виробничого приміщення.

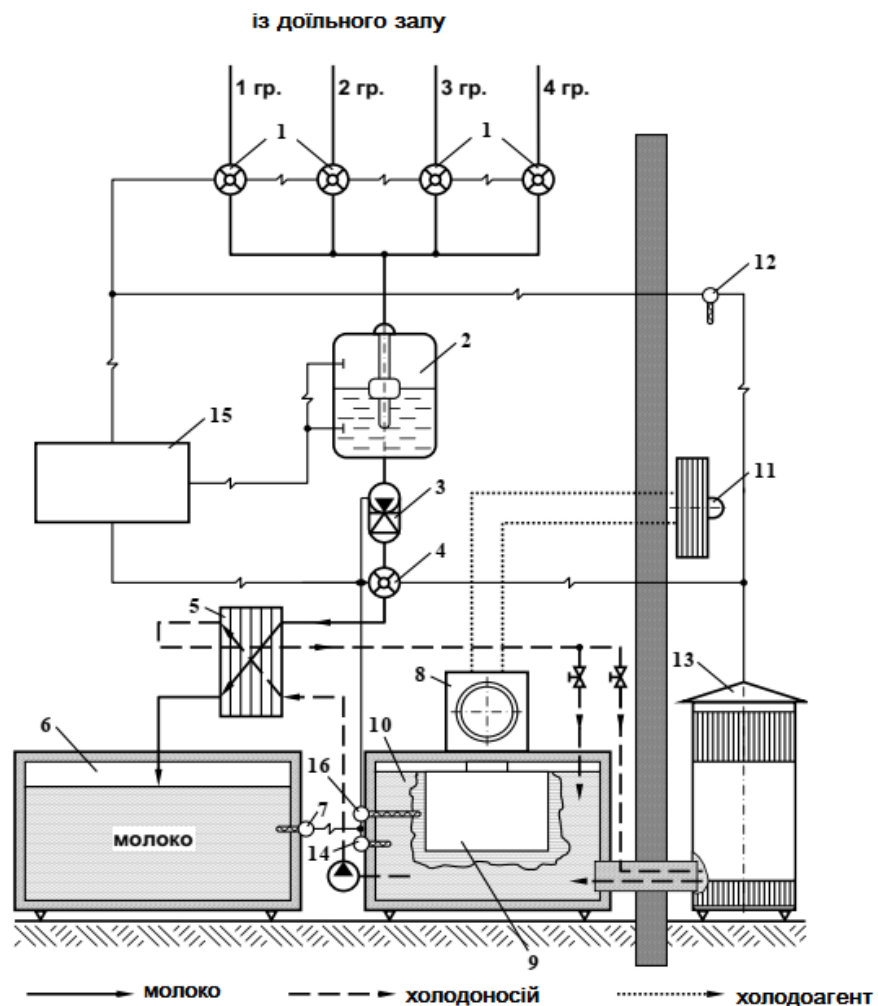


Рисунок 3.2. Функціональна схема енергозберігаючої системи охолодження молока з акумуляцією холоду: 1 – групові лічильники молока (датчики); 2 – вакуумований релізер; 3 – молочний насос із зворотним

клапаном; 4 – датчик загального обліку молока; 5 – теплообмінник; 6 – резервуар-термос для зберігання молока; 7, 12, 14 – датчики температури; 8 – компресорно-конденсаторний агрегат; 9 – випарник; 10 – акумулятор холоду; 11 – виносний конденсатор; 13 – градирня водокрижаного типу; 15 – блок керування; 16 – датчик товщини наморозки льоду

Молоко з доїльної установки через групові лічильники молока 1 надходить у вакуумований релізер 2 з встановленими в ньому датчиками рівня, керуваними роботою універсального молочного насоса із зворотним клапаном 3. Далі молоко надходить через датчик загального обліку молока 4 теплообмінник 5, де охолоджується і потрапляє в резервуар-термос для зберігання молока 6 з датчиком температури 7.

Холод у вигляді крижаної води та водного льоду накопичується в акумуляторі холоду 10. Лід наморозується на випарнику 9, з'єднаному з компресорно-конденсаторним агрегатом 8.

Охолоджувальна система виконується в двох варіантах: з конденсатором, вбудованим компресорно-конденсаторний агрегат 8, і виносним конденсатором 11, встановленим на відкритому повітрі. Виносний конденсатор дозволяє використовувати природний холод зовнішнього повітря в холодну пору року і нічний час доби зниження температури конденсації хладагенту та підвищення ефективності холодильної установки.

В акумулятор холоду 10 при мінусовій температурі зовнішнього повітря сигналу датчика температури 12 надходить холод у вигляді крижаної води від градирні водокрижаного типу, розташованої на відкритому повітрі 13. При цьому збільшується холодоприйняття та акумулююча здатність системи за рахунок додаткового об'єму акумулятора.

Система охолодження працює в такий спосіб. За сигналом датчика температури холодоносія 14 блоку управління 15 включається компресорно-конденсаторний агрегат 8, який знижує температуру охолоджувача і заморожує лід. Вагу льоду, накопиченого в акумуляторі 10, можна визначити за допомогою датчика 16.

Сигнали про кількість залишкового холоду в акумуляторі 10 і молока, що надходить на охолодження доїльних апаратів, отриманих з датчиків 1, 4 і 16 направляються на блок управління 15, де визначається кількість льоду, яке повинно бути додатково наморозене для підтримки потрібного запасу холоду в межах акумулюючої здатності акумулятора 10 і з використанням пільгового тарифу на електроенергію.

Конденсатор 11, що відводить теплоту в довкілля, може виконуватися як в агрегатованому, і виносному варіантах.

У першому випадку він відводить теплоту у виробниче приміщення, підвищуючи температуру конденсації.

У другому випадку він виносить теплоту в довкілля, знижуючи температуру конденсації та покращуючи енергетичний режим роботи холодильної машини. Холодильний коефіцієнт при цьому підвищується.

### 3.2. Результати дослідження енергозберігаючої системи охолодження молока

Охолодження води та заморожування льоду переважно відбувається із використанням природного холоду. Використання стороннього джерела холоду має місце лише при температурі зовнішнього повітря вище нуля або при недостатній кількості холоду для своєчасного охолодження води та подальшого наморожування льоду. Також наморожування льоду з використанням стороннього джерела може відбуватися у періоди часу, коли діє пільговий тариф на електроенергію.

Основним елементом установки є льодоаккумулятор, який при різних режимах роботи здійснює теплообмін з іншими елементами установки, що більш наочно показано на рис. 3.3.

Проведені на сьогодні досліді дозволяють отримати загальну картину процесу охолодження води та наморожування льоду при використанні природного холоду. На рис. 3.4 наведено графік, побудований за результатами дослідів, на якому зображено процес зміни температури води в льодоаккумуляторі процесі наморожування льоду без використання штучного холоду, виключно за допомогою зовнішнього природного холодного повітря (температура зовнішнього повітря при проведенні дослідів становила приблизно  $-10-12$  °C). Наприкінці дослідів маса льоду в аккумуляторі становила приблизно 6 кг.

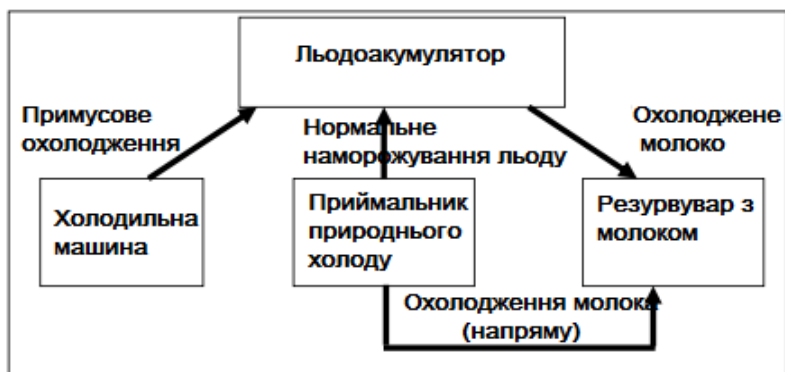


Рисунок 3.3 – Блок-схема дослідів вальної системи з можливими напрямками низькопотенційної енергії

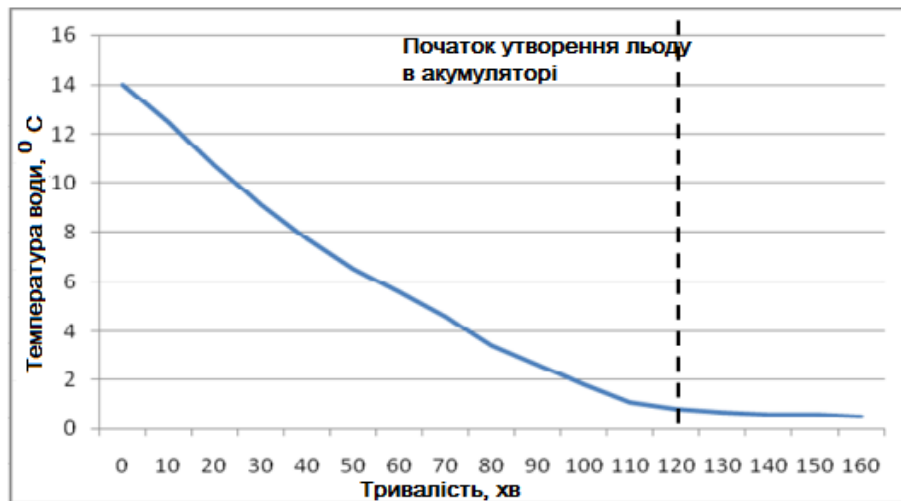


Рисунок 3.4. – Змінення температури води у крижаному акумуляторі при використанні природного холоду

З графіка (рис. 3.4.) видно, що інтенсивне утворення льоду за умов проведення досліду почалося через 2 години після запуску установки. При необхідності підвищення характеристики може бути збільшена (наприклад, при нестачі холоду зовні) шляхом включення холодильної машини з зануреним у воду випарником.

Необхідність включення холодильної машини визначатиметься автоматизованою системою управління, виходячи з показників датчиків і поточного алгоритму роботи, що визначається програмою.

Утворення льоду на зануреному теплообміннику знизило теплообмін з водою акумулятор, внаслідок чого, як видно на графіку, під час процесу льодоутворення, середня температура води в акумуляторі стабілізувалася на рівні приблизно 0,5 °C.

Крім основних параметрів, наведених вище, в ході дослідів реєструвалися для подальшого аналізу низку інших параметрів, що змінюються з тривалістю часу та, які впливають на загальну ефективність установки.

Наявність акумулятора холоду комбінованої дії дає змогу ефективно використовувати акумуляторно холодильної машини у нічний час доби протягом усього року.

Таким чином, підвищення ефективності холодильних установок здійснюється за рахунок скорочення капітальних та експлуатаційних витрат за зниження встановленої потужності акумуляторно холодильної машини; скорочення витрат на електроенергію під час використання вигідного нічного тарифу; економії енергії під час використання природного холоду; економії енергії на привід холодильної машини під час її експлуатації вночі.



Застосування нового енергозберігаючого обладнання дозволить знизити витрати на електроенергію (30...40 %) за рахунок використання природного холоду зовнішнього повітря та пільгового нічного тарифу, зниження вартості та встановленої потужності холодильних машин.

Енергозберігаюча система охолодження може працювати на технологічних лініях обробки молока, як з проточними, так і з ємнісними теплообмінниками, забезпечуючи скорочення капітальних та експлуатаційних витрат.

### **3.3. Висновки по розділу 3**

В кваліфікаційній роботі були запропоновані водокрижані акумулятори, які можуть застосовуватися при модернізації холодильних систем, що використовують лід для накопичення природного та штучного холоду, покращення графіків споживання теплової енергії, удосконалення енергобалансу господарства, використання пільгового нічного тарифу та оптимізації режимів роботи електроустаткування, при цьому енерговитрати на охолодження молока скорочуються у 1,5-2 рази.

## ВИСНОВКИ

Заморожування водяного льоду є дуже енергоємним процесом. На виробництво 1 т водяного льоду витрачається близько 90 кВт.год. електроенергії. Тому дуже актуальним при охолодженні молока є розробка та впровадження енергозберігаючих режимів роботи холодильного обладнання при отриманні льоду в акумуляторах із застосуванням природного холоду. У кваліфікаційній роботі наведено опис різних технологічних схем комбінованих водокрижаних акумуляторів з використанням природного холоду.

Залежно від обсягу молока, що надходить на охолодження, представлена методика розрахунку кількості акумуляованої енергії у вигляді льоду та потужності холодильного обладнання, необхідної для заморожування льоду.

Конструкція акумулятора холоду забезпечує його роботу у всьому діапазоні температур зовнішнього повітря протягом цілого року. Приймач – акумулятор природного холоду встановлюється на відкритому повітрі поза виробничим приміщенням, а підзарядна холодильна установка у виробничому приміщенні. У зимовий період вона працює як акумулятор природного холоду, а у літній – підзарядна холодильна установка, при цьому використовуючи позапікову електроенергію, заряджає холодом акумулятор холоду комбінованої дії, який використовується для охолодження молока.

Як підзарядні можуть використовуватися будь-які холодильні установки. Проведені дослідження показали, що запропоновані схеми комбінованих водольодових акумуляторів можна використовувати як базові моделі для подальшого вдосконалення енергозберігаючих систем охолодження молока на фермах.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Автоматизація технологічних процесів і системи автоматичного керування: Навчальний посібник /Барало О.В., Самойленко П.Г., Гранат С.Є., Ковальов В.О. К.: Аграрна освіта, 2010. 557 с.
2. Гончар В.Ф., Тищенко Л.П. Електрообладнання і автоматизація с.-г. агрегатів і установок. К.: Вища школа, 1989. 343 с.
3. Грищенко В. О. Типові технологічні процеси і холодильне обладнання для зберігання рослинної продукції: моделювання, динамічні режими, керування : монографія. Київ : ЦП «Компринт», 2018. 248 с.
4. Іваненко В.Ф. Системи технології у тваринництві / В.Ф. Іваненко. К.: КНЕУ, 1999. 186 с.
5. Котов Б. І., Грищенко В. О. Моделювання перехідних режимів обладнання холодильної камери та структури системи автоматичного керування (САК) температурно-вологісним режимом. Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин. 2010. Вип. 39. С. 62–67.
6. Мартиненко І.І. Автоматизація технологічних процесів сільськогосподарського виробництва. К.: Урожай, 1995.
7. Масліков М.М. Холодильна технологія: Курс лекцій для студ. спец. 6.090500 “Холодильні машини і установки”, напр. 0905 “Енергетика” ден. та заоч. форм навч. К.: НУХТ, 2009. 162 с.
8. Масліков М.М. Холодильна технологія харчових продуктів: Навч. посіб. К.: НУХТ, 2007. 335 с.
9. Машкін М. І., Париш Н. М. Технологія молока і молочних продуктів: Навчальне видання. К.: Вища освіта, 2006. 351 с.: іл.
10. Машкін М.І. Молоко і молочні продукти. К.: Урожай, 1996. 336 с.
11. Машкін М.І. Первинна обробка і переробка молока. К.: Урожай, 1994. 237 с.
12. Омельченко О. В., Цвіркун Л. О., Ларін О. О. Моделювання холодильного обладнання для зберігання плодово-овочевої сировини. Обладнання та технології харчових виробництв. Кривий Ріг : ДонНУЕТ, 2021. Вип. 2 (43). С. 131–138. doi : 10.33274/2079-4827- 2021-43-2-131-138.
13. Оніщенко В. П. Вторинні холодоносії // Холод М+Т. 2005, №5 с. 26–31.
14. Остапенко О. В., Зімін О. В., Подмазко І. О., Хмельнюк М. Г. Шляхи підвищення енергоефективності холодильної установки підприємства харчової промисловості. Холодильна техніка та технологія. 2016. № 52 (6). С. 4–10. doi: 10.15673/ret.v52i6.464

15. Холодильне обладнання вагонів: Навч. посібник / І.Е. Мартинов, В.М. Іщенко, Н.С. Брайковська та ін. Харків: УкрДАЗТ, 2013. 134 с.
16. Automatic controls for industrial refrigeration systems. Retrieved from: <https://web.fe.up.pt/~ee99259/projecto/conteudo%20teorico/artigos/Automatic%20Controls%20for%20Industrial%20Refrigeration%20Systems.pdf>.
17. <https://agrofrost.com.ua/uk/ustanovka-kompleksu-obladnannya-dlya-o/>
18. <https://favor-ltd.net/ua/p1247888857-mgnovennoe-ohlazhdenie-moloka.html>