

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

УДК 637.115:621.565

Кваліфікаційна робота на правах
рукопису

ЄВТУХ Олександр Юрійович

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

**УДОСКОНАЛЕННЯ СИСТЕМИ ОХОЛОДЖЕННЯ ДОЇЛЬНОЇ
УСТАНОВКИ З РОЗРОБКОЮ КОНСТРУКЦІЇ АКУМУЛЯТОРА
ТЕПЛОТИ МОЛОКА**

208 «Агроінженерія»

Подається на здобуття освітнього ступеня бакалавр

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
к.т.н., професор Б. А. Шелудченко

Житомир – 2026

АНОТАЦІЯ

Євтух О. Ю. **Удосконалення системи охолодження доїльної установки з розробкою конструкції акумулятора теплоти молока.** – Кваліфікаційна робота на правах рукопису.

Кваліфікаційна робота подається на здобуття першого освітнього ступеня бакалавр зі спеціальності 208 – агроінженерія. – Поліський національний університет, Житомир, 2026 р.

Кваліфікаційна робота спрямована на пошук рішень підвищення енергоефективності технологічного процесу охолодження молока на тваринницькій фермі. Проведений аналіз конструкцій та способів охолодження молока, встановлені позитивні та негативні сторони, визначені шляхи покращення спрямовані на зниження енергоємності технологічного процесу.

Розроблений в кваліфікаційній роботі охолодник молока типу спірального, виконані розрахунки конструкційних та технологічних параметрів, запропонована технологічна схема отримання підігріву води від теплоти молока, встановлено економічну ефективність системи охолодження та акумулювання теплоти молока порівняно із базовою технологією.

Ключові слова: охолоджувач молока, тепломасообмін, акумулятор теплоти, теплоємність.

ANNOTATION

O. Yu. Yevtukh. **Improvement of the cooling system for a milking machine with the design of a milk heat accumulator.** – Qualification work in the form of a manuscript.

The qualification work is submitted for the first degree of bachelor in specialty 208 – agricultural engineering. – Polissia National University, Zhytomyr, 2026.

This thesis aims to identify solutions for improving the energy efficiency of the milk cooling process on a dairy farm. An analysis of milk cooling designs and methods was conducted, positive and negative aspects were identified, and improvement strategies aimed at reducing the energy intensity of the process were proposed.

A spiral-type milk cooler was developed in this thesis; calculations of structural and technological parameters were performed; a process flow diagram for obtaining water heating from milk heat was proposed; and the economic efficiency of the milk cooling and heat storage system was established compared to the baseline technology.

Keywords: milk cooler, heat and mass transfer, heat accumulator, heat capacity

ЗМІСТ

ВСТУП	4
РОЗДІЛ 1. ОЦІНКА ТЕХНОЛОГІЧНИХ СХЕМ ОХОЛОДЖЕННЯ МОЛОКА НА ДОЇЛЬНИХ УСТАНОВКАХ	7
1.1. Значення технологічного процесу охолодження молока під час доїння	7
1.2. Аналіз конструкцій охолодників молока для доїльних установок	8
Висновки до розділу 1	11
РОЗДІЛ 2. РОЗРОБЛЕННЯ КОНСТРУКЦІЇ УТИЛІЗАТОРА ТЕПЛОТИ МОЛОКА	12
2.1. Аналіз конструкційно-технологічних схем акумуляторів теплоти молока	12
2.2. Розрахунок розробленого утилізатора теплоти молока	17
Висновки до розділу 2	24
РОЗДІЛ 3. ОЦІНКА ТЕХНІКО-ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ РОЗРОБЛЕНОГО УТИЛІЗАТОРА ТЕПЛОТИ МОЛОКА	25
3.1. Розроблення правил використання акумулятора теплоти молока	25
3.2. Встановлення техніко-економічних показників розробленого акумулятора теплоти молока	26
Висновки до розділу 3	31
ВИСНОВКИ	32
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	34
ДОДАТКИ	36

ВСТУП

Актуальність теми. Сучасний розвиток агропромислового комплексу України, зокрема галузі молочного скотарства, нерозривно пов'язаний із необхідністю впровадження енергозберігаючих та ресурсощадних технологій. Первинна обробка молока на тваринницьких комплексах є одним із найбільш енергомістких процесів. Згідно з технологічними вимогами, свіжовидоєне молоко з температурою близько 35°C необхідно протягом 2-3 годин охолодити до температури 4-6°C для збереження його бактеріостатичних властивостей та високої якості. На забезпечення цього процесу витрачається значна кількість електричної енергії, тоді як колосальний потенціал теплоти самого молока просто розсіюється в навколишнє середовище. Утилізація та повторне використання цієї теплової енергії для технологічних потреб ферми (наприклад, для підігріву води для напування тварин) є резервом підвищення енергоефективності виробництва.

Питаннями інтенсифікації теплообмінних процесів та модернізації обладнання для первинної обробки молока займаються велика кількість вітчизняних та закордонних виробників. У відомих конструкціях систем охолодження найчастіше застосовують пластинчасті або трубчасті теплообмінники-рекуператори. Проте їх використання часто обмежується нерівномірністю графіків доїння та витрати гарячої води на фермі, що призводить до втрати частини теплової енергії через відсутність ефективних проміжних ланок накопичення. Наявні конструкції акумуляторів тепла часто мають високу металомісткість, складні у виготовленні або мають недостатню інтенсивність теплообміну в динамічних режимах роботи доїльних установок. Залишаються недостатньо вивченими питання узгодження динамічних характеристик надходження молока під час доїння із параметрами накопичення теплоти в акумулюючих ємностях, а також обґрунтування конструктивних параметрів теплообмінних елементів таких акумуляторів, які б забезпечували максимальний температурний потенціал нагріваного середовища при мінімальних гідравлічних опорах.

Таким чином, існує потреба в розробці оптимізованої, конструктивно простої та ефективної системи охолодження молока із одночасним акумулюванням його теплоти для потреб ферми.

Мета кваліфікаційної роботи.

Підвищення енергетичної та технологічної ефективності системи охолодження доїльної установки шляхом обґрунтування конструктивно-технологічних параметрів охолодника молока.

Завдання, що необхідно вирішити у роботі:

- проаналізувати сучасний стан, тенденції розвитку та проблемні питання енергозбереження в процесах первинної обробки молока на тваринницьких фермах;
- виконати теоретичне обґрунтування технологічної схеми акумулювання теплоти та конструкції охолодника молока;
- визначити режими роботи та теплофізичні характеристики розробленої конструкції спірального охолодника молока;
- виконати техніко-економічну оцінку та енергетичну ефективність впровадження удосконаленої системи охолодження доїльної установки у виробничий процес.

Об'єкт дослідження.

Процес первинної обробки молока на молочно-товарних фермах та пов'язані з ним процеси теплообміну в системах первинного охолодження.

Предмет дослідження.

Закономірності теплообмінних процесів у системі охолодження молока, конструктивно-технологічні параметри та режими роботи розробленого охолодника молока.

Методи дослідження.

В процесі виконання кваліфікаційної роботи використовувались відомі методи оцінки гідравлічних процесів, теплообмінних та масообмінних процесів, термодинаміки та теплотехнічних закономірностей аграрного виробництва, відомих методів обрахунку та аналізу отриманих даних з використанням

програмного забезпечення що має безкоштовний вільний доступ, в тому числі продуктів програмних середовища Microsoft.

Апробація кваліфікаційної роботи.

За результатами виконання кваліфікаційної роботи написані дві тези, які розміщені у збірниках, оприлюднення результатів відбувалось через доповіді на студентських наукових конференціях:

1. Євтух О. Ю. Енергозберігаючі технології в системі виробництва молока. *Студентські читання–2025* : матеріали науково-практичної конференції. 30 жовтня 2025 р. Житомир: Поліський національний університет, 2025. С. 145–147.

2. Євтух О. Ю. Аналіз теплових характеристик рекуператорів у системі охолодження молока. *Наукові читання – 2026* : збірник тез доповідей науково-практичної конференції за підсумками І-го туру Всеукраїнського конкурсу студентських наукових робіт з галузей знань і спеціальностей. 20 квітня 2026 р. Житомир: Поліський національний університет, 2026. Ч. 2. С. 120–123.

Структура кваліфікаційної роботи.

До складу кваліфікаційної роботи входить пояснювальна записка сформована із трьох розділів основного викладу матеріалу, вступу, загальних висновків та списку літературних джерел які були використані при написанні роботи, у додатках подано методику розрахунку та інша довідникова інформація. Пояснювальна записка кваліфікаційної роботи написана державною мовою на 35 сторінках машинопису, має 4 таблиці та 9 рисунків.

РОЗДІЛ 1

ОЦІНКА ТЕХНОЛОГІЧНИХ СХЕМ ОХОЛОДЖЕННЯ МОЛОКА НА ДОЇЛЬНИХ УСТАНОВКАХ

1.1. Значення технологічного процесу охолодження молока під час доїння

Під час машинного доїння корів основними джерелами бактеріального обсіменіння молока найчастіше стають забруднений шкірний покрив вимені, а також недостатньо якісно вимиті доїльні стакани, молочні шланги, молочні канали та інші конструктивні деталі молокопроводу. Крім того, мікроорганізми можуть потрапляти в сировину з повітря тваринницького приміщення, яке всмоктується через камери постійного атмосферного тиску колектора та пульсатора доїльного апарату [1-3].

Свіжовидоєне молоко має титровану кислотність у межах 16-18 °Т.

Під час синтезу молока в організмі корови до його складу переходять імунні тіла (імуноглобуліни) та інші захисні компоненти, які стримують життєдіяльність і розмноження бактерій у свіжовидоєній сировині. Період дії цих цінних біологічних властивостей називають бактерицидною фазою.

Тривалість бактерицидної фази безпосередньо залежить від рівня дотримання санітарно-гігієнічних вимог під час отримання молока, а також від температури молока.

Так, при температурі молока 310 К (37°C) та 303 К (30°C) бактерицидна фаза триває лише від 2 до 5 годин. При зниженні температури до 289К (16°C) та 286 К (13°C) її тривалість за умов добового зберігання збільшується та становить від 7 до 36 годин. За температури 277-278 К (4-5°C) життєдіяльність більшості груп бактерій практично припиняється, що забезпечує оптимальні умови для тривалого зберігання молока без втрати його якості. [1-3]

Саме тому первинне охолодження та подальша переробка молока мають здійснюватися за умов суворого дотримання діючих санітарних і ветеринарно-санітарних правил для молочних ферм усіх форм господарювання.

1.2. Аналіз конструкцій охолодників молока для доїльних установок

Охолодження молока (до $+4^{\circ}\text{C}$) є одним з найбільших споживачів енергії на молочних фермах. На охолодження молока припадає близько 30% загальних витрат електроенергії на фермі. Використання енергії можна значно зменшити шляхом попереднього охолодження молока. За допомогою пластинчастого охолоджувача молоко охолоджується перед тим, як воно потрапить у резервуар для остаточного охолодження та тимчасового зберігання молока (рис. 1.1).

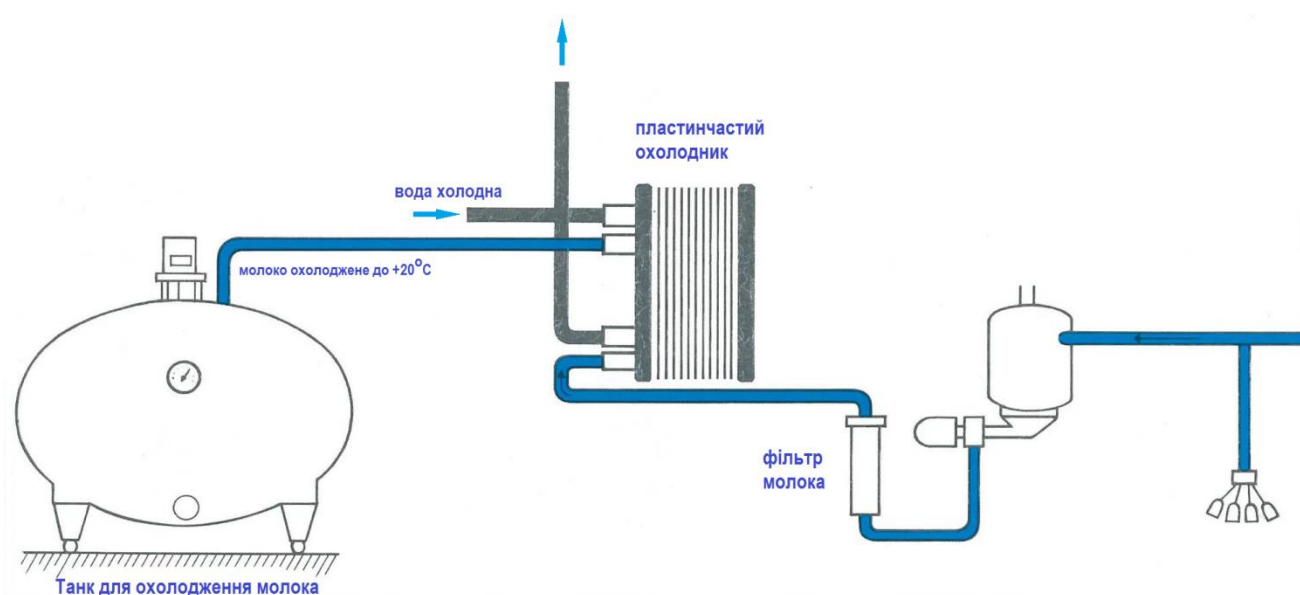
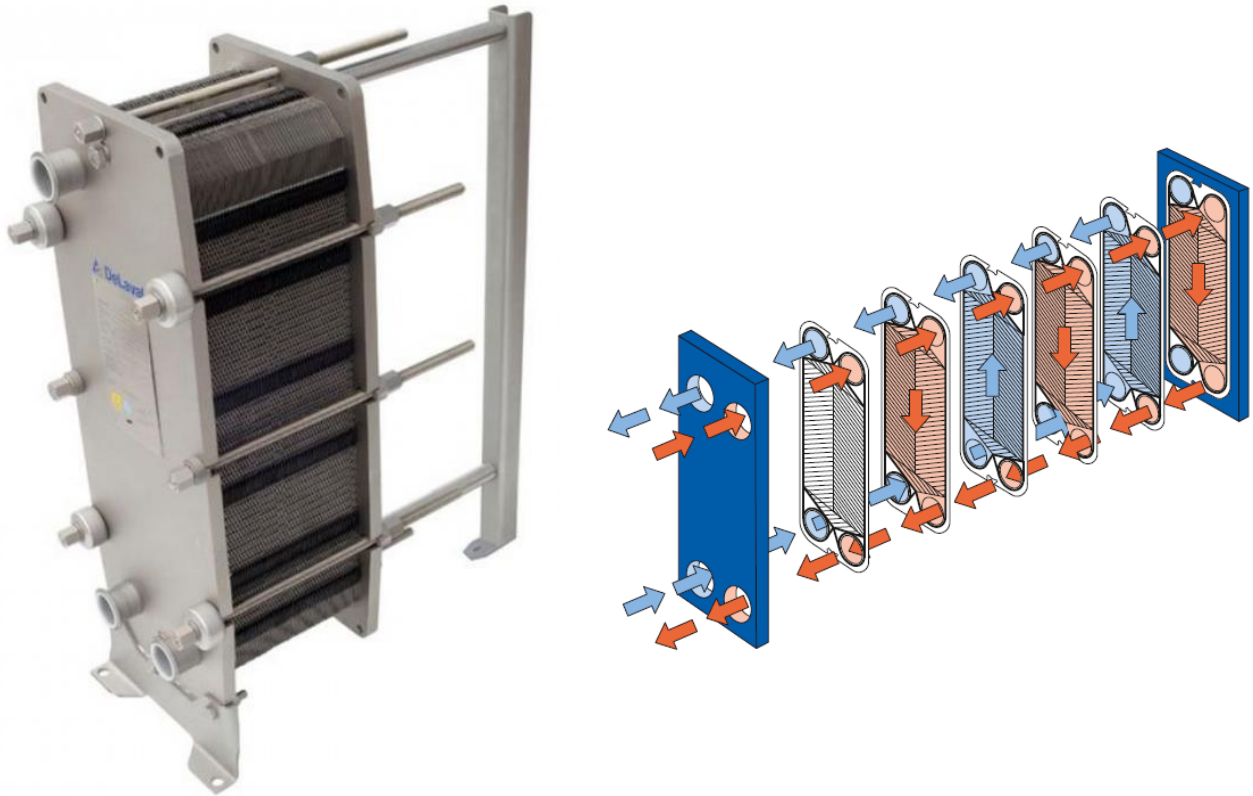


Рис. 1.1. Схема технологічного процесу охолодження молока під час машинного доїння корів. [4-6]

Технологічний процес охолодження молока (рис. 1.2) відбувається у такій послідовності.

1. Молоко від доїльних апаратів через молокопровід надходить до молокоприймача.
2. Молочний насос подає молоко до очисника і далі проштовхує молоко в тонкому шарі між пластинами які розділяють потік охолоджувальної рідини.
3. Молоко віддає через пластини своє тепло охолоджувальній рідині та направляється у танк-охолодник для подальшого зберігання.

Встановивши пластинчастий охолоджувач відповідного типорозміру (рис. 1.2) можна знизити температуру молока від 36°C до $+16...+20^{\circ}\text{C}$, що дозволяє скоротити час на остаточне охолодження до $+4^{\circ}\text{C}$ у резервуарі для зберігання молока. Це дозволить суттєво підвищити ефективність виробництва молока та знизити його собівартість. [7]



загальний вигляд

схема роботи

Рис. 1.2. Пластинчастий охолоджувальник молока в потоці [7]

Основними перевагами пластинчастого охолодника є:

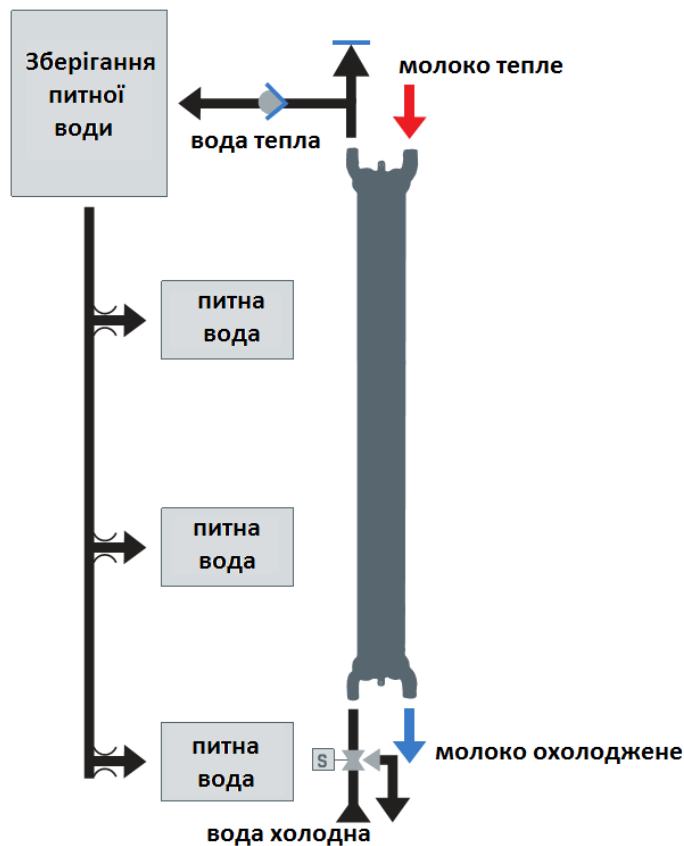
- швидкість – майже миттєве охолодження в потоці на відміну від тривалого охолодження в танках, що потребує додаткових витрат на перемішування;
- якість – значне зниження температури запобігає розмноженню мікроорганізмів;
- енергоефективність – використання пластинчастого теплообмінника зменшує навантаження на холодильні агрегати.

Установки є розбірними, що дозволяє періодично промивати, дезінфікувати та перевіряти стан кожної пластини. В процесі автоматизованої

промивки доїльної установки, миючі розчини також пропускаються через охолодник.

Проте пластинчастий охолодник вибагливий до якості води та дії миючих засобів, тому менш надійний порівняно із трубчастими системами попереднього охолодження молока.

Порівняно із пластинчастими теплообмінниками, трубчастий охолоджувач (рис. 1.3) потребує меншого тиску для технологічного процесу охолодження та промивання. Окрім цього, молоко швидше охолоджується до $+4^{\circ}\text{C}$, що є значною перевагою для отримання сировини високої якості. У країнах ЄС діють суворі вимоги до тривалості охолодження молока, тому трубчаста конструкція є більш переважною. [7-10]



Використання резервуара для води
із функцією зливу

технологічний процес



загальний вигляд

Рис. 1.3. Трубчастий («труба в трубі») охолоджувальник молока. [9]

Залежно від температури та кількості води (рекомендується, щоб потік води принаймні вдвічі перевищував потік молока) попереднє охолодження

молока до $+20^{\circ}\text{C}$ може зменшити використання енергії до 45%. Для досягнення оптимальних результатів необхідно забезпечити безперервний потік молока та вертикальне розташування установки.

Можуть використовуватись наступні технологічні схеми: забір води, що використовується для питного водопостачання, за допомогою резервуара для зберігання води, без функції зливу; забір води, що використовується для питного водопостачання, за допомогою резервуара для зберігання води, включаючи функцію зливу; забір води, що використовується для питного водопостачання циркуляційною системою, включаючи функцію зливу; забір води, що використовується для питного водопостачання циркуляційною системою, без функції зливу.

Трубчастий охолодник за однакових умов сприяє значно швидшому охолодженню молока порівняно із пластинчастим, оскільки менше перешкод рухові молока при значній площі теплообміну.

Висновки до розділу 1

1. Найбільшого поширення на доїльних установках набули пластинчасті охолодники молока. Проте, значні трудозатрати під час обслуговування та чутливість до особливостей технологічного процесу, спонукають виробників доїльного обладнання до використання трубчастих охолодників.

2. Сучасне молочне тваринництво стикається з подвійним викликом: необхідністю суворого дотримання технологічних режимів зберігання продукції та постійним зростанням вартості енергоносіїв. Охолодження молока відразу після доїння є критичним процесом, що забезпечує бактеріологічну стабільність продукту. Водночас цей процес супроводжується виділенням величезної кількості низькопотенційного тепла, яке зазвичай просто розсіюється в навколишнє середовище.

РОЗДІЛ 2

РОЗРОБЛЕННЯ КОНСТРУКЦІЇ УТИЛІЗАТОРА ТЕПЛОТИ МОЛОКА

2.1. Аналіз конструкційно-технологічних схем акумуляторів теплоти молока

Одним із можливих варіантів зниження витрат на виробництво молока є використання технологій пов'язаних із акумулюванням вторинного тепла. Відомо, що молоко під час доїння має достатню температуру ($+36^{\circ}\text{C}$), тому при застосуванні системи рекуперації це тепло можна використовувати для отримання теплої води (рис. 2.1). [11-13]

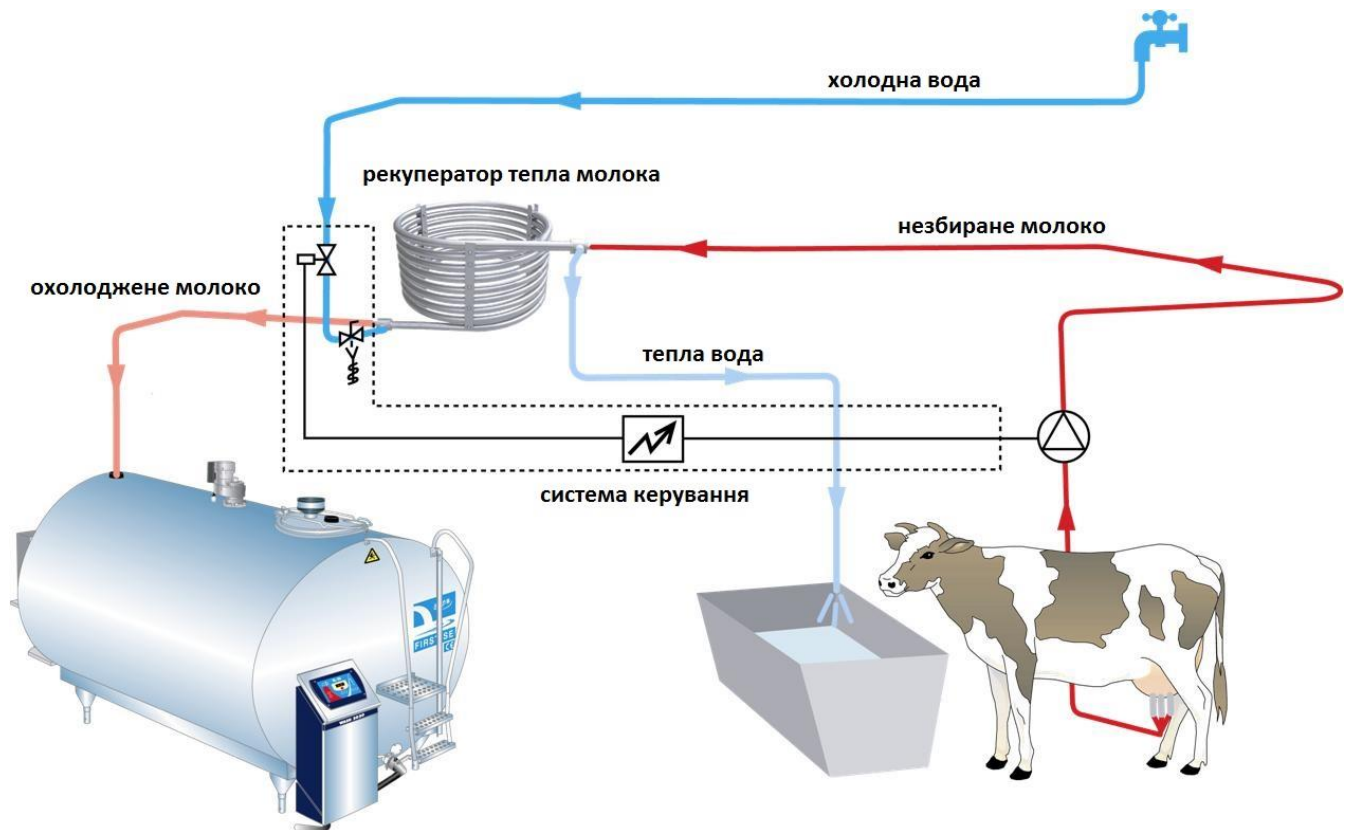


Рис. 2.1. Схема акумулювання теплоти молока трубчасто-спіральним утилізатором.

За деякими даними дослідників скорочується використання електроенергії аж до 50% від витрат на отримання гарячої води на тваринницькому підприємстві. Можна отримувати воду із температурою 16°C

із можливістю підігріву додатковими системами нагріву до температури 45...50°C, при значно менших витрат на електроенергію. [14]

При використанні рекуператора тепла молока на підігрівання води для напування тварин у холодну пору року не витрачається додаткових коштів а тому зменшуються витрати на електроенергію. Підігріту воду можна використовувати для інших цілей, наприклад для промивання доїльного обладнання. Використання для миття рук обслуговуючим персоналом і т.д.

Використання систем рекуперації тепла (рис. 2.1) дозволяє не лише знизити навантаження на холодильні установки, а й отримати «безкоштовну» гарячу воду для потреб ферми (напування тварин, санітарна обробка обладнання). [14]

Молоко виходить з вимені корови при температурі приблизно 35-37°C. Згідно з санітарними нормами, його необхідно охолодити протягом перших двох годин до +4°C.

Розрахунок кількості тепла, яке необхідно відвести від молока, проводиться за формулою, кДж: [14]

$$Q = m \cdot c (T_1 - T_2), \quad (2.1)$$

де m – маса молока;

c – питома теплоємність молока;

T_1 – початкова температура молока;

T_2 – кінцева температура молока.

При охолодженні 1000 літрів молока вивільняється близько 35 кВт енергії. Без рекуперації ця енергія витрачається на нагрів повітря компресорами. Рекуператор дозволяє використати з користю це тепло, використовуючи воду як теплоносії.

Детальний аналіз теплових характеристик різних типів рекуператорів проводиться з метою встановлення найбільш ефективних конфігурацій. У системах охолодження молока використовують переважно два методи рекуперації:

Пряма рекуперація (Milk-to-Water) – тепло передається від гарячого молока безпосередньо до холодної води через теплообмінник перед тим, як молоко потрапить у танк-охолоджувач (див. рис. 2.1).

Непряма рекуперація (Refrigerant-to-Water) – тепло забирається від холодоагенту (фреону) у компресорній установці для нагріву води (рис. 2.2). Холодна вода, що надходить із водопровідної мережі, підігрівається до температури 50-60°C завдяки передачі тепла від холодоагенту холодильної установки молочного танка. Витрати енергії на отримання нагрітої води знижуються на 50-60% порівняно із традиційними системами отримання теплої води на молочному підприємстві. [15-17]

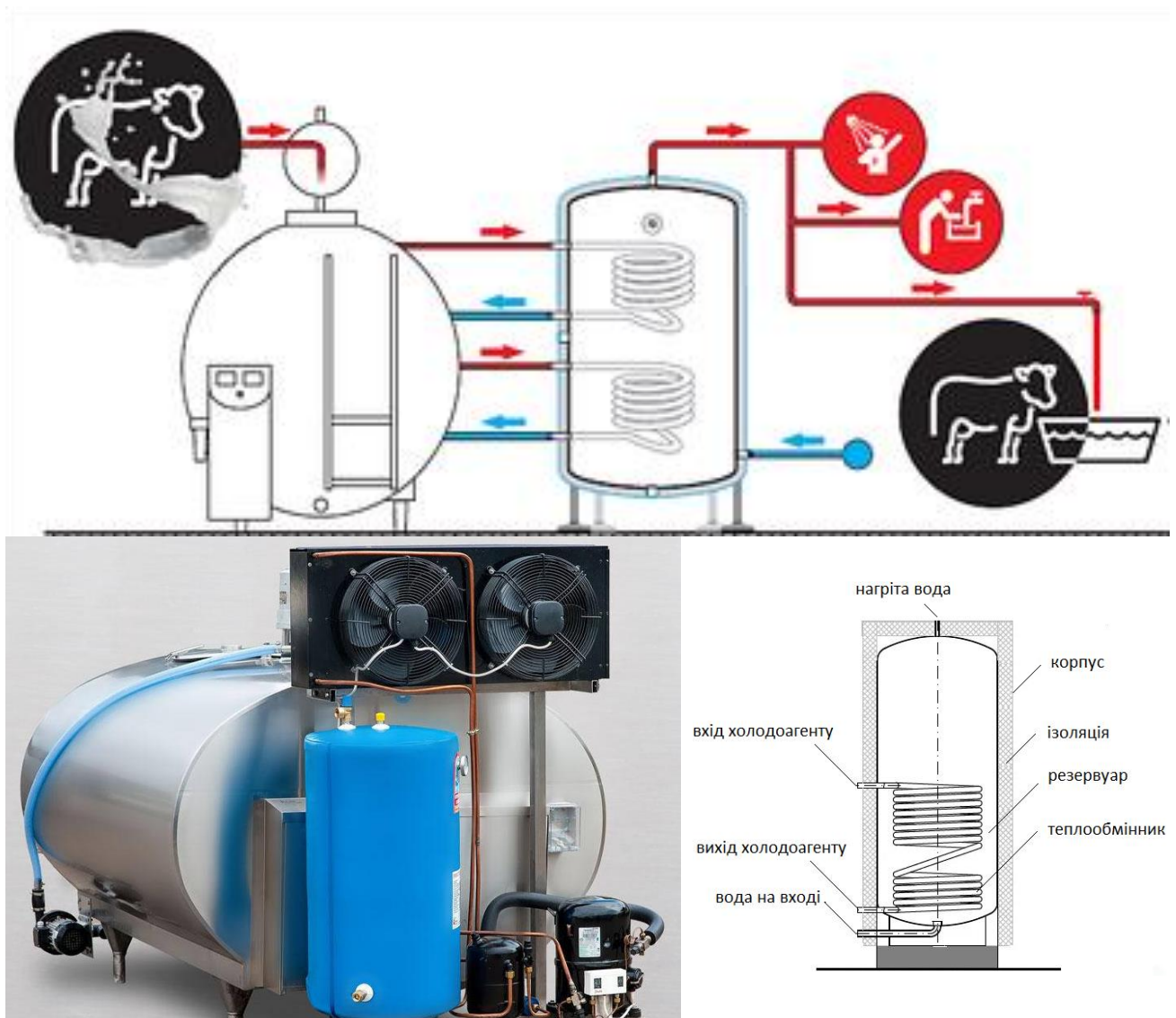


Рис. 2.2. Система відбору тепла від конденсатора компресорної установки танка-охолодника [15-17]

Найбільш поширеними є три основні типи теплообмінних апаратів:

- трубчасті («труба в трубі») – складаються з двох концентричних труб. Молоко тече по внутрішній трубі, вода – у просторі між трубами просторі.
- пластинчасті теплообмінники – складаються з набору тонких гофрованих пластин. Між однією парою пластин тече молоко, а між іншою – охолоджувальна вода.
- об'ємні рекуператори – змішувачі, занурені безпосередньо в баки з водою.

Основним показником ефективності рекуператорів вважається коефіцієнт теплопередачі, Вт/м²·К: [14-17]

$$k = \frac{Q}{A \cdot \Delta T_{ln}}, \quad (2.2)$$

де A – площа поверхні теплообміну;

ΔT_{ln} – середньологарифмічна різниця температур.

У пластинчастих рекуператорів завдяки високій турбулізації потоку в тонких каналах, коефіцієнт теплопередачі у 3-5 разів вищий, ніж у трубчастих. Це дозволяє досягти високої ефективності при компактних розмірах.

Трубчасті рекуператори мають менший опір потоку, але потребують значно більших площ для аналогічних показників, як у пластинчастих рекуператорів.

Отже, одним із важливих аспектом при виборі типу рекуператора є гідравлічний тиск, який необхідно створити для подолання опору переміщення рідини. Пластинчасті моделі створюють вищий опір, що потребує встановлення насосів вищого напору, проте забезпечують майже миттєве охолодження молока зі зниженням температури на 15-20°C на шляху до танка-охолодника.

З точки зору максимальної передачі тепла від молока до охолоджуючої рідини, найбільш ефективним є пластинчастий апарат. До основних переваг такого теплообмінника слід віднести наступні:

- високий коефіцієнт ефективності – найвищий серед усіх доступних типів;
- високий температурний напір – дозволяє працювати з мінімальною різницею температур між середовищами (до 1-2°C).
- легкість масштабування – можливість додавати пластини для збільшення продуктивності.
- висока гігієнічність – легко розбирається для механічного очищення (що критично для молока, яке схильне до утворення пригару та молочного каменю).

При використанні пластинчастого рекуператора за схемою «молоко-вода», температуру молока можна знизити з 37°C до 15-18°C на шляху до танка-охолодника. Це скорочує витрати електроенергії на роботу холодильної машини танка-охолодника до 40-60%. [15-17]

Отримане від молоко тепло використовується для нагрівання води, яку використовують для потреб тваринницького підприємства.

Це найбільш енергоефективний шлях використання рекуперованого тепла у теплій воді – це напування тварин. Позитивною ознакою напування тварин теплою водою є фізіологічний ефект – у зимовий період корови витрачають значну частину енергії корму на зігрівання. Встановлено, що використання води з температурою 15-18°C сприяє підвищенню надоїв корів на 3-5%.

Тепла вода з рекуператора може змішуватися з холодною водою із артезіанської свердловини до потрібної температури, а може віддавати своє тепло у місткості, де додатково підігрівається для побутових та технологічних потреб, зокрема промивання доїльної установки, очищення танків-охолодників, прибирання молочної та ін. Підігрів, отриманої від рекуператора, води до температури 65-70°C за допомогою електричних пристроїв дозволяє економити до 70% витрат на гаряче водопостачання.

Проте, більшість тваринницьких ферм не мають танків-охолодників, а охолоджене молоко спрямовують безпосередньо до місткостей-термосів або безпосередньо до автоцистерн. Тому, першочерговим завданням кваліфікаційної роботи є розроблення пристрою саме для первинного

охолодження молока із системою акумулювання його теплоти шляхом отримання теплої води для напування тварин.

2.2. Розрахунок розробленого утилізатора теплоти молока

Відповідно до оцінки рекуператорів теплоти молока найбільш ефективною технологічною схемою є використання пластинчастого теплообмінника. Це пояснюється можливістю отримання найбільшого значення коефіцієнта ефективності за рахунок організації інтенсивного потоку між пластинами. Проте, така схема потребує значних тисків які має створити молочний насос для проштовхування молока між пластинами. Натомість, теплообмінник за системою «труба в трубі» має значно менший опір на переміщення молока, що зменшує руйнівний вплив на структуру молока. Але така схема потребує більше площ теплообмінних, або використання більшої кількості теплообмінників.

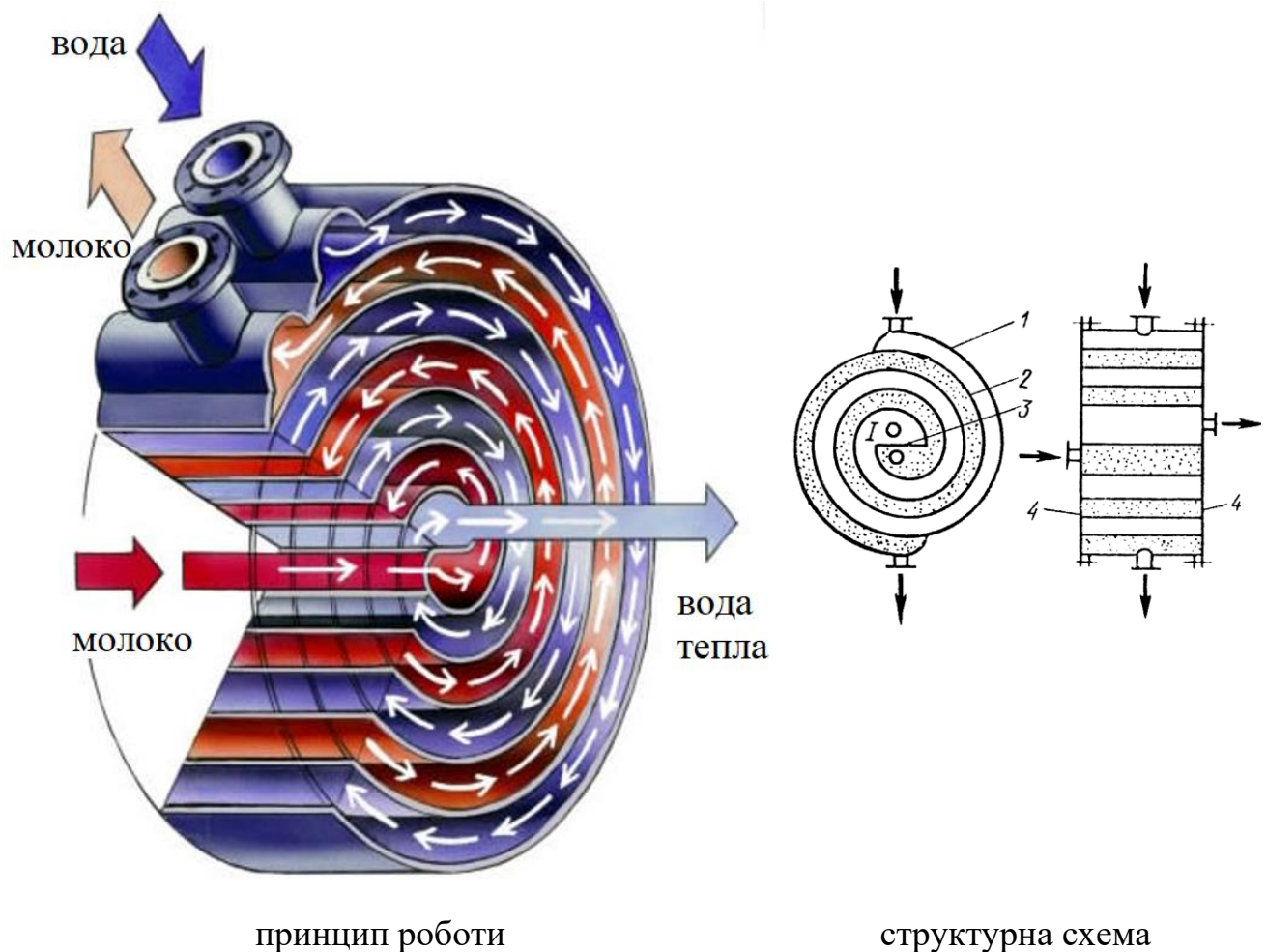
У кваліфікаційній роботі пропонується конструкція теплообмінного апарата, з можливістю нагріву води для напування тварин, спірального типу. Такий утилізатор теплоти молока буде поєднувати позитивні сторони як пластинчастих так і трубчастих теплообмінних апаратів. Так, рух молока та води у кільцевому просторі між суміжними теплообмінними поверхнями буде мати значно менший опір на переміщення ніж у пластинчастого апарата – позитивна ознака системи «труба в трубі». Закручена у спіраль теплообмінні пластини дозволяє збільшити площу поверхні для теплообмінних процесів між рідинами – молоком та охолоджувальною водою – що є позитивною ознакою пластинчастих теплообмінників. Таким чином, поєднання позитивних ознак двох типів рекуператорів дозволить отримати систему із вищим показником ефективності ніж серійне виробників обладнання.

Розроблений теплообмінник буде використовуватись для підігрівання артезіанської води у системі напування корів. Такий підхід вважається найбільш раціональним, особливо у холодну пору року. У зимовий період

корови витрачають значну частину енергії корму на зігрівання холодної води в організмі. Подача води з температурою $+15...+18^{\circ}\text{C}$ дозволить підвищити надої коров на 3-5%. Тепла вода з рекуператора може змішується з холодною з артезіанської свердловини до потрібної температури (залежно від сезону) і подається в групові напувалки. [15-17]

При використанні рекуператора тепла молока на підігрівання води для напування тварин у холодну пору року не витрачається додаткових коштів а тому зменшуються витрати на електроенергію. Підігріту воду можна використовувати для інших цілей, наприклад для промивання доїльного обладнання.

Структурно-технологічна схема розробленого рекуператора зображена на рис. 2.3.



принцип роботи
структурна схема
Рис. 2.3. Структурна схема утилізатора теплоти молока спірального типу:
1 – зовнішня стінка; 2 – внутрішня стінка; 3 – роздільна площина; 4 – бокові стінки.

Концепція спірального теплообмінника така ж проста, як і складна. Два або чотири довгі металеві листи укладаються спіраллю навколо центральної труби, утворюючи два або чотири однопоточні канали. Для того, щоб забезпечити постійну величину проміжків до однієї сторони листів приварюються розділові шипи. Рух потоків у спіральних теплообмінниках відбувається по криволінійних каналах близьких формою до концентричних кіл. Геометрія каналів та розділові шипи створюють значну турбулентність вже за низьких швидкостей потоків, при цьому покращується теплопередача та зменшується забруднення.

Все це обумовлює компактність конструкції спіральних теплообмінників, які можуть бути інтегровані в будь-яку технологічну лінію, що значно скорочує витрати на монтаж.

Спіральні теплообмінники не вимагають складного сервісного обслуговування, оскільки мають міцну і жорстку цільнозварну конструкцію і мало забруднені. Спіральні теплообмінники часто є найбільш оптимальним та економічним рішенням задач теплообміну.

Розрахунок теплообмінника-утилізатора теплоти молока будемо визначати з врахуванням потреби у воді для напування тварин на фермі та інтенсивності технологічної лінії машинного доїння корів. Послідовність розрахунку наступна.

Визначаємо швидкісні параметри руху рідини у просторі між пластинами за формулою: [18,19]

$$v = \frac{Q}{b \cdot h \cdot m}, \quad (2.3)$$

де Q_p – об’ємна витрата рідини;

b – ширина між пластинами у каналі;

h – висота по канала;

m – кількість задіяних каналів.

Для потоку молока, м/с:

$$\nu_m = \frac{0,00277}{0,27 \cdot 0,0028 \cdot 12} = 0,305.$$

Для потоку рідини холодильної, м/с:

$$\nu_p = \frac{0,01662}{0,27 \cdot 0,0028 \cdot 12} = 1,8.$$

Визначається число Рейнольдца для потоку рідин за формулою: [18,19]

$$R_e = \frac{\omega_c \cdot d_e}{\nu}, \quad (2.4)$$

де ω_c – швидкість у потокові за середнім значенням;

ν – в'язкість кінематична рідини;

d_e – діаметр потоку у трубопроводі еквівалентний.

$$R_e = \frac{0,3 \cdot 0,056}{1,79 \cdot 10^{-6}} = 5628.$$

Визначається середній показник коефіцієнту опірності місцевої для потоку рідини між двома суміжними поверхнями залежно від швидкісних витрат рідин за формулою: [18,19]

$$\mu = \frac{\mu_1 + \mu_2}{2}, \quad (2.5)$$

$$\mu = \frac{18,8 + 44,8}{2} = 31,8.$$

Необхідний напір, який втрачений в циркуляційному мережі системи яка охоплює насос та розроблений апарат утилізації тепла молока, являє собою суму лінійних та місцевих гідравлічних втрат у підвідних трубопроводах та гідравлічних утрат в просторі між поверхнями спіралей. Для частини циркуляційного мережі, яка проходить через між каналами частини утилізатора який відповідає за охолодження-нагрів, напір визначають за формулою: [18,19]

$$h_m = \frac{\zeta \cdot \omega^2}{2 \cdot g} \quad (2.6)$$

де ζ – коефіцієнт який визначає опір потоку;

ω – найвища швидкість руху рідини.

В секції апарата для остаточного охолодження молока, втрати напірності рідини визначають за формулою: [18,19]

$$H_n = \left(1 + \lambda \frac{1}{d} + \sum \zeta\right) \cdot \frac{\left(\frac{4 \cdot Q}{\pi \cdot d^2}\right)^2}{2 \cdot g} + i \cdot \mu \cdot \frac{\left(\frac{Q}{b \cdot h \cdot m}\right)^2}{2 \cdot g}, \quad (2.7)$$

Підставивши деякі відомі значення величин у формулу (2.7) отримаємо:

$$\begin{aligned} H_n &= \left(1 + 0,0315 \frac{4}{0,07} + 4 \cdot 0,3\right) \frac{\left(\frac{4 \cdot Q}{3,14 \cdot 0,07^2}\right)^2}{2 \cdot 9,81} + 1 \cdot 31,8 \frac{\left(\frac{Q}{0,27 \cdot 0,0028 \cdot 12}\right)^2}{2 \cdot 9,81} = \\ &= 13780 \cdot Q^2 + 19625 \cdot Q^2 = 33405 \cdot Q^2. \end{aligned}$$

Підставивши замість позиції Q значення об'ємного витрачання рідини отримаємо необхідне розрахункове значення напору. Отримані під час обрахунку значення розміщені у таблиці 2.1.

Таблиця 2.1

Розрахункові параметри потоку рідини

Втрати рідини Q , м ³ /год	20	30	40	50	60
Необхідний напір H_n , м	2,85	6,42	11,4	17,82	25,67

При подачі рідини за послідовною схемою через секції з водою охолодженою за допомогою льоду та артезіанською водою яка в подальшому

буде використовуватись для напування тварин теплою водою, гідро опір в циркуляційній мережі, буде визначатись на основі отриманої формули:

$$H_{nl} = \left(1 + 0,0315 \frac{4}{0,07} + 4 \cdot 0,3 \right) \cdot \frac{\left(\frac{4 \cdot Q}{3,14 \cdot 0,07^2} \right)^2}{2 \cdot 9,81} + 2 \cdot 31,8 \frac{Q}{2 \cdot 9,81} =$$

$$= 137,80 \cdot Q^2 + 39250 \cdot Q^2 = 53030 \cdot Q^2$$

Підставивши замість позиції Q значення об'ємного витрачання рідини отримаємо необхідне розрахункове значення напору (H_{nl}). Отримані під час обрахунку значення розміщені у таблиці 2.2.

Таблиця 2.2

Розрахункові параметри потоку рідини

Втрати рідини Q , м ³ /год	20	30	40	50	60
Необхідний напір H_{nl} , м	5,31	11,86	21,09	32,95	47,45

В координатах потоку (Q) та потрібного напору (H) (рис. 2.4) будуємо характеристику $H_n=f(Q)$ для циркуляційного мережі, яка включає попереднє охолодження та таку ж характеристику яка визначає залежність втрати напору від продуктивності витрати води для обох циркуляційних блоків. Аналогічно на графіку можна побачити характеристику насосів які дещо відмінні за своїми технологічними параметрами.

Відповідно до рис. 2.4, точка А на перехрещення кривих дає режим роботи насоса у системі потоку холодної льодової рідини ($Q=47$ м³/год; $H=16,5$ м).

Відповідно до рис. 2.4, точка Б на перехрещенні кривих дає режим роботи насоса в системі двох секцій розробленого спірального теплообмінного апарата ($Q=39$ м³/год; $H=20$ м).

Отримані дані дають можливість встановити необхідні параметри потоків рідин у просторах між стінками утвореними спіральними поверхнями.

Нанесені на рис. 2.4 точки В і Г відповідають використанню насоса із іншими характеристиками співвідношення між подачею та напором, що дає можливість обрати оптимальний варіант залежно від технологічного параметру машинного доїння корів безпосередньо на тваринницькому підприємстві.

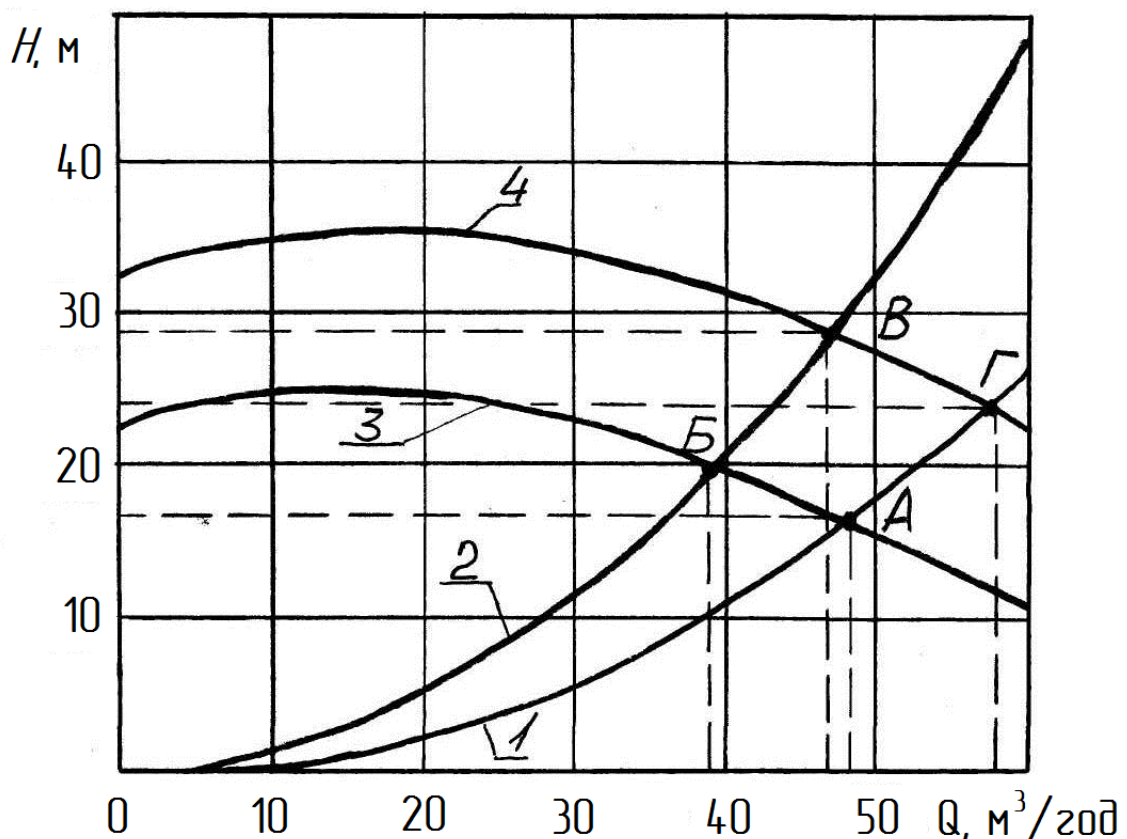


Рис. 2.4. Графік залежності необхідного напору від діючої подачі рідини у системі циркуляції розробленого теплообмінного апарата (1, 2) та характеристика насоса (3, 4).

Таким чином, отримані технологічні параметри системи дозволяють узгодити фактичні потреби підприємства у теплій воді із режимами роботи теплообмінного апарата та насосного обладнання.

Висновки до розділу 2

1. Система рекуперації не лише дозволяє зменшити витрати на електроенергію, а й покращує фізіологічний стан тварин завдяки напуванню їх теплою водою, що сприяє зростанню продуктивності тварин. Використання рекуператорів у системах охолодження молока – це не просто екологічний тренд, а необхідна умова виживання та розвитку сучасного агробізнесу в умовах енергетичної кризи.

2. Розроблений спіральний теплообмінний апарат для відбору тепла молока з метою нагріву води для напування тварин та потреб тваринницького підприємства відзначається суттєвою перевагою порівняно із пластинчастим теплообмінником – плавний рух молока без змін напрямку потоку на протилежний. Це сприятиме збереженню цілісності молочних жирових кульок і як наслідок збереження технологічних властивостей молока для подальшої переробки. Окрім цього, із-за гладкої поверхні стінок буде залишатись чистою значно більший час із-за ефекту самоочищення. Цього неможливо досягнути у пластинчастих теплообмінниках із-за рифленої поверхні, тому потребують розбирання для очищення.

РОЗДІЛ 3

ОЦІНКА ТЕХНІКО-ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ РОЗРОБЛЕНОГО
УТИЛІЗАТОРА ТЕПЛОТИ МОЛОКА

3.1. Розроблення правил використання акумулятора теплоти молока

Технологічна схема використання розробленої системи акумулювання теплоти молока для подальшого використання теплої води для напування тварин представлена на рис. 3.1.

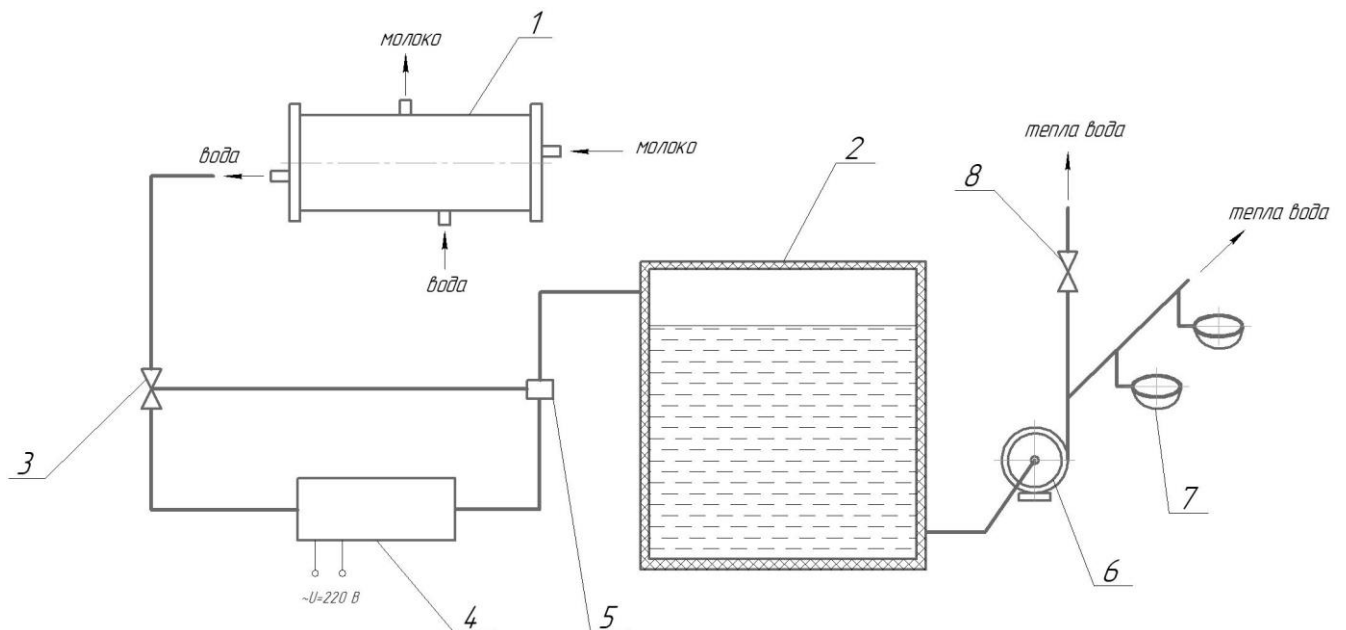


Рис. 3.1. Схема технологічного процесу забезпечення тварин теплою водою: 1 – розроблений теплообмінний апарат; 2 – місткість для теплої води із термоізоляцією; 3 – кран триходовий; 4 – електричний підігрівач води; 5 – датчик температури води; 6 – насос відцентровий; 7 – автонапувалка для тварин; 8 – кран спрямування води на технічні потреби.

Пропонована енергозберігаюча установка (рис. 3.1) призначена для ефективного охолодження молока та раціонального використання теплових ресурсів. До її складу входять такі конструктивні елементи:

- двосекційний спіральний теплообмінник, у якому як холодоносії використовуються артезіанська (для потреб тваринницького підприємства) та льодяна вода (охоłodжена за допомогою холодильних установок або льодогенератора);

- триходовий кран скерування потоку;
- електроводопідігрівач;
- давач температури;
- накопичувальний резервуар для збору підігрітої води;
- відцентровий водяний насос;

Головна особливість цієї установки полягає в тому, що використана артезіанська вода у системі охолодження молока не скидається в каналізацію, а спрямовується в накопичувальний резервуар для вторинного використання.

Для ефективного охолодження молока в першій секції потокових тонкошарових охолоджувачів без марних втрат води доцільно застосовувати комплексну технологічну схему, зображену на рис. 3.1. Відповідно до цієї схеми, водопровідна вода після охолодження свіжовидоєного молока нагрівається на 8–10°C. Ця підігріта вода повертається у водопровідну систему і подається в автонапувалки для тварин. Таке рішення підвищує продуктивність худоби, оскільки тварини витрачають значно менше внутрішнього «біологічного тепла» на зігрівання питної води в організмі, особливо у холодний період року. У періоди, коли охолоджувач молока з якихось причин не працює, комплексна схема передбачає пряме транспортування водопровідної води до автонапувалок із автоматичним увімкненням електропідігрівача для підтримання оптимальної температури води.

3.2. Встановлення техніко-економічних показників розробленого акумулятора теплоти молока

Розроблена конструкція спірального теплообмінного апарата для утилізації теплоти видоєного теплого молока зображене на рис. 3.2.

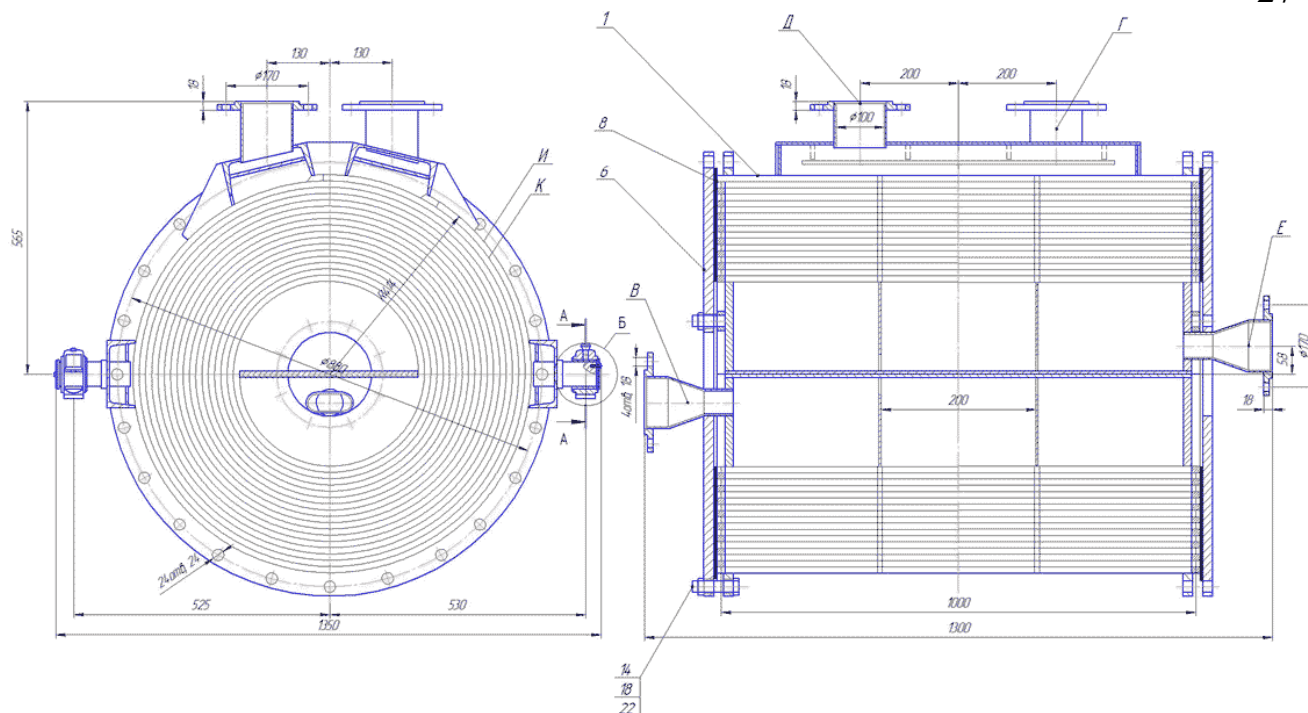


Рис. 3.2. Розроблений спірального типу утилізатор теплоти молока

Розрахунок теплообмінника виконується відповідно до загальновідомих методик викладених у літературних джерелах із конструювання теплообмінних апаратів. Що стосується спірального теплообмінника розрахунок теплотехнічних характеристик подано у додатку кваліфікаційної роботи.

Для порівняльного аналізу виконаємо розрахунок двоетапного охолодження молока на тваринницькому підприємстві порівняно із пластинчастим теплообмінником.

Технологічний процес охолодження характеризується зниженням температури молока в першій секції охолодника від 35°C до 8°C , при цьому охолоджувальна артезіанська вода яка надходить із водопровідної системи тваринницької ферми змінює свою температуру від $6-8^{\circ}\text{C}$ до $23-25^{\circ}\text{C}$. Остаточне охолодження молока до температури 4°C здійснюється льодяною водою з початковою температурою $0,5-1^{\circ}\text{C}$. Ефект від застосування такої схеми полягає в тому, що для приготування льодяної води буде витратитися менше енергетичних ресурсів льодогенератора або холодильної машини для зниження температури молока до бажаних 4°C для тривалого зберігання у молочному танку.

Розрахунок будемо проводити для 1000 літрів видоєного молока, яке йде на охолодження.

Так, якщо використовувати тільки одно етапне охолодження льодяною водою, необхідна теплова потужність для зниження температури молока становитиме, кДж: [18,19]

$$Q = m \cdot c_m (t_1 - t_2), \quad (3.1)$$

де m – маса молока;

c_m – питома теплоємність молока;

t_1 – початкова температура молока;

t_2 – кінцева температура молока.

$$Q = 1000 \cdot 3,9107(35 - 4) = 117321.$$

У випадку двоетапного охолодження маємо:

для етапу попереднього охолодження артезіанською водою, кДж:

$$Q_1 = 1000 \cdot 3,9107(35 - 8) = 398568,$$

для етапу охолодження льодяною водою, кДж:

$$Q_2 = 1000 \cdot 3,9107(11 - 5) = 23464,2.$$

На другому етапі охолодження кількість необхідної енергії для відведення тепла льодяною водою становитиме, кДж:

$$Q_e = Q - Q_2, \quad (3.2)$$

$$Q_e = 117321 - 23464,2 = 93856,8.$$

Таким чином економиться 93856,8 кДж енергії на приготування льодяної води. При цьому, на приготування артезіанської води додаткових витрат на охолодження молока не передбачено, оскільки така вода за схемою прототипу використовувалась для потреб тваринницької ферми.

Розрахунок витрат на процес охолодження молока за одно стадійною та двостадійною схемою зведено до таблиці 3.1.

Таблиця 3.1

Порівняльна оцінка технологічних схем

Параметр	Технологічна схема	
	базова	пропонована
Потужність льодогенераторної установки, кВт	6	6
Тривалість роботи протягом доби, год	6	6
Витрати електроенергії протягом доби, кВт×год	108	21,6
Витрати на електроенергію, грн/добу	1296	259,2
Додаткова вартість обладнання (з врахуванням вартості розробленого спірального охолодника), грн	-	302456
Річна економія коштів, грн	-	378432
Термін окупності додаткових вкладень, роки	-	0,79

Охолоджувачі типу «труба-в трубі» за однакових витрат на обладнання дозволяють знизити температуру молока на етапі попереднього охолодження до 16-20°C, що дозволяє знизити до 50% витрат на електроенергію [] для наступного охолодження молока до температури 4°C.

Пропонована технологічна схема дозволяє знизити витрати на остаточне охолодження молока до 80%, що вказує на значно вищу ефективність розробленого спірального охолодника молока. В пропонованому апараті температура молока знижується до 8°C при цьому температура артезіанської води на виході із теплообмінника зростає до 23-25°C. Це відбувається за рахунок збільшення площі поверхні теплообміну порівняно із апаратом типу «труба-в трубі».

Конструкційно-технологічні параметри розробленого спірального теплообмінного апарата, розрахованого відповідно до методики викладеної у додатку А, подано у таблиці 3.2.

Таблиця 3.2

Параметри розробленого спірального теплообмінника

Параметр	Позначення, одиниця виміру	Потік молока	Потік охолоджувальної рідини
Масовий витрата	m (кг/с)	0,2877	1,003
Температура на вході	T_i (К)	308,15	279,15
Температура на виході	T_o (К)	281,15	298,15
Щільність	ρ (кг/м ³)	1036	1000
Питома теплоємність	C_p (Дж/кг К)	3930	4182
В'язкість	μ (Па·с)	0,00125	0,0147
Теплопровідність	k (Вт/м·К)	0,580	0,574
Стійкість до забруднення	R_f (м ² ·К / Вт)	$1,0567 \cdot 10^{-4}$	$1,0567 \cdot 10^{-4}$
Теплопровідність матеріалу поверхні	k_p (Вт/м·К)	14,53	14,53
Максимальний перепад тиску	$\Delta P_{\max}$ (кПа)	6,894	6,894

Розрахунок розробленого теплообмінника-утилізатора теплоти молока вказав на його досить високу ефективність, зокрема значно менші втрати тиску на проштовхування молока та охолоджуючої рідини. Для виготовлення апарата використовується нержавіюча сталь 12X18H10T за ДСТУ: 5632-93, або альтернатива європейського маркування AISI-316. Зменшення втрат тиску

спонукатиме до зменшення потужності на привод насосів для подачі води та молока, що в підсумку, також, вплине на економію енергоресурсів.

Висновки до розділу 3

1. Запропонована двостадійна технологічна схема охолодження молока із використанням розробленого спірального типу охолодника. В першій секції охолодника температура молока знижується від 35°C до 8°C, при цьому охолоджувальна артезіанська вода яка надходить із водопровідної системи тваринницької ферми змінює свою температуру від 6-8°C до 23-25°C. Остаточне охолодження молока до температури 4°C здійснюється льодяною водою з початковою температурою 0,5-1°C. Ефект від застосування такої схеми полягає в тому, що для приготування льодяної води буде витратитися менше енергетичних ресурсів льодогенератора або холодильної машини.

2. Пропонована технологічна схема дозволяє знизити на 80% витрати електроенергії на остаточне охолодження молока, порівняно із класичною системою охолодження молока до бажаних 4°C тільки льодяною водою. Окрім цього, використання підігрітої до температури 23-25°C артезіанської води для напування корів дозволить спрямувати їх додаткову енергію на збільшення продуктивності, а не на підтримання необхідної температури організму, особливо за сучасних технологій утримання. Річний економічний ефект від застосування розробленого теплообмінника у запропонованій технологічній схемі становить 378432 грн, додаткові капіталовкладення окупляться протягом 0,79 років.

3. Розроблений спіральний теплообмінний апарат на 30% ефективніший порівняно із теплообмінним апаратом типу «труба-в трубі» за однакових масо-габаритних параметрів, за рахунок збільшення площі поверхні теплообміну.

ВИСНОВКИ

1. Найбільшого поширення на доїльних установках набули пластинчасті охолодники молока. Проте, значні трудозатрати під час обслуговування та чутливість до особливостей технологічного процесу, спонукають виробників доїльного обладнання до використання трубчастих охолодників.

2. Сучасне молочне тваринництво стикається з подвійним викликом: необхідністю суворого дотримання технологічних режимів зберігання продукції та постійним зростанням вартості енергоносіїв. Охолодження молока відразу після доїння є критичним процесом, що забезпечує бактеріологічну стабільність продукту. Водночас цей процес супроводжується виділенням величезної кількості низькопотенційного тепла, яке зазвичай просто розсіюється в навколишнє середовище.

3. Система рекуперації не лише дозволяє зменшити витрати на електроенергію, а й покращує фізіологічний стан тварин завдяки напуванню їх теплою водою, що сприяє зростанню продуктивності тварин. Використання рекуператорів у системах охолодження молока – це не просто екологічний тренд, а необхідна умова виживання та розвитку сучасного агробізнесу в умовах енергетичної кризи.

4. Розроблений спіральний теплообмінний апарат для відбору тепла молока з метою нагріву води для напування тварин та потреб тваринницького підприємства відзначається суттєвою перевагою порівняно із пластинчастим теплообмінником – плавний рух молока без змін напрямку потоку на протилежний. Це сприятиме збереженню цілісності молочних жирових кульок і як наслідок збереження технологічних властивостей молока для подальшої переробки. Окрім цього, із-за гладкої поверхні поверхня стінок буде залишатись чистою значно більший час із-за ефекту самоочищення. Цього неможливо досягнути у пластинчастих теплообмінниках із-за рифленої поверхні, тому потребують розбирання для очищення.

5. Запропонована двостадійна технологічна схема охолодження молока із використанням розробленого спірального типу охолодника. В першій секції

охолодника температура молока знижується від 35°C до 8°C, при цьому охолоджувальна артезіанська вода яка надходить із водопровідної системи тваринницької ферми змінює свою температуру від 6-8°C до 23-25°C. Остаточне охолодження молока до температури 4°C здійснюється льодяною водою з початковою температурою 0,5-1°C. Ефект від застосування такої схеми полягає в тому, що для приготування льодяної води буде витратитися менше енергетичних ресурсів льодогенератора або холодильної машини.

6. Пропонована технологічна схема дозволяє знизити на 80% витрати електроенергії на остаточне охолодження молока, порівняно із класичною системою охолодження молока до бажаних 4°C тільки льодяною водою. Окрім цього, використання підігрітої до температури 23-25°C артезіанської води для напування корів дозволить спрямувати їх додаткову енергію на збільшення продуктивності, а не на підтримання необхідної температури організму, особливо за сучасних технологій утримання. Річний економічний ефект від застосування розробленого теплообмінника у запропонованій технологічній схемі становить 378432 грн, додаткові капіталовкладення окупляться протягом 0,79 років.

7. Розроблений спіральний теплообмінний апарат на 30% ефективніший порівняно із теплообмінним апаратом типу «труба-в трубі» за однакових масо-габаритних параметрів, за рахунок збільшення площі поверхні теплообміну.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Фененко А. І. Механізація доїння корів. Теорія і практика. К., 2008. 200 с.
2. Палій А. П., Палій А. П., Науменко О. А. Інноваційні технології та технічні системи у молочному скотарстві. Х., 2015. 323 с.
3. Вимоги до обладнання для охолодження та зберігання молока. URL: <https://www.milkua.info/uk/post/vimogi-do-obladnanna-dla-oholodzenna-ta-zberiganna-moloka>
4. Plate milk cooler OMP -1. URL: <https://standartmoloko.com/en/oxladitel-moloka-plastinchatyj-omp-1>
5. Пластинчасті охолоджувачі ОПМ. URL: https://www.palladium-milk.com.ua/ukr/catalog/plastynchasti_okholodzhuvachi_teploobminnyky_opm/
6. Охолоджувачі пластинчасті. URL: http://www.attis.com.ua/site/equipment/plate_coolers.html?lang=ua
7. Охолоджувач пластинчастий. URL: <https://www.kmbp.com.ua/produktsiya/rishennia-dlia-molochnoi-promyslovosti/pasterizatori-ta-okholodzhuvachi/okholodzhuvach-plastynchastyi>
8. Євтух О. Ю. Енергозберігаючі технології в системі виробництва молока. *Студентські читання–2025* : матеріали науково-практичної конференції. 30 жовтня 2025 р. Житомир: Поліський національний університет, 2025. С. 145–147.
9. Pipe Cooler. URL: <https://en.paulmueller.com/milk-cooling-and-storage/pipe-cooler>
10. Кремерс Р. Енергозбереження в молочному скотарстві. URL: <https://milkua.info/uk/post/energozberezenna-v-molocnomu-skotarstvi-Tech>
11. Рішення для агропромислового комплексу: енергозбереження в молочному скотарстві. URL: <https://ukraine-oss.com/rishennya-dlya-agropromyslovogo-kompleksu-energozberezhennya-v-molochnomu-skotarstvi/>

12. Heat recovery with the Mueller Fre-Heater. URL: <https://en.paulmueller.com/milk-cooling-and-storage/heat-recovery-systems/model-d-fre-heater>

13. Охолодження молока на молочних фермах. URL: <https://milkua.info/uk/post/oholodzenna-moloka-na-molocnih-fermah>

14. Євтух О. Ю. Аналіз теплових характеристик рекуператорів у системі охолодження молока. *Наукові читання – 2026* : збірник тез доповідей науково-практичної конференції за підсумками І-го туру Всеукраїнського конкурсу студентських наукових робіт з галузей знань і спеціальностей. 20 квітня 2026 р. Житомир: Поліський національний університет, 2026. Ч. 2. С. 120–123.

15. Interaction of vortices induced by fixed-distance columns with Dean vortices increases the local heat transfer on the convex surface contacting with the wake region of the column in spiral plate heat exchanger. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1290072925006362>

16. Effects of Temperature Differences in Optimization of Spiral Plate Heat Exchangers. URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/s41660-020-00128-5>

17. Overall heat transfer coefficient optimization in a spiral-plate heat exchanger Overall heat transfer coefficient optimization in a spiral-plate heat exchanger. URL: https://www.researchgate.net/publication/345640374_Overall_heat_transfer_coefficient_optimization_in_a_spiral-plate_heat_exchanger_Overall_heat_transfer_coefficient_optimization_in_a_spiral-plate_heat_exchanger

18. Розрахунок теплообмінних апаратів [Електронний ресурс] : навч. посібник / І. О. Назарова, Н. О. Притула. – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020. – 51 с.

19. Чепурний М. М., Ткаченко С. Й. Розрахунок тепломасообмінних апаратів: навч. посібник. Вінниця: ВНТУ, 2006. 130 с.