

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Криворізький національний університет
Навчально-науковий інститут економіки і торгівлі
імені Михайла Туган-Барановського
Кафедра загальноінженерних дисциплін та обладнання

ДОПУСКАЮ ДО ЗАХИСТУ
Гарант освітньої програми
«Обладнання переробних і харчових
виробництв»

_____ Цвіркун Л.О.
«____» _____ 2026 року

**ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА
ДО КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ**
на здобуття ступеня вищої освіти «Бакалавр»
зі спеціальності 133 «Галузеве машинобудування»
за освітньою програмою «Обладнання переробних і харчових виробництв»
на тему: **«УДОСКОНАЛЕННЯ ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ ТЕПЛОВОЇ
ОБРОБКИ МОЛОКА»**

Виконав:

здобувач вищої освіти _____ Третяк Владислав Вадимович _____
(прізвище, ім'я, по-батькові) (підпис)

Керівник:

_____ зав.каф., к.т.н., доцент, Омельченко О.В. _____
(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали) (підпис)

Засвідчую, що у кваліфікаційній
роботі немає запозичень з праць інших
авторів без відповідних посилань

Здобувач вищої освіти _____
(підпис)

Кривий Ріг
2026

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Криворізький національний університет
Навчально-науковий інститут економіки і торгівлі
імені Михайла Туган-Барановського
Кафедра загальноінженерних дисциплін та обладнання

Форма здобуття вищої освіти денна
Ступінь бакалавр
Галузь знань Механічна інженерія
Освітня програма Обладнання переробних і харчових виробництв

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Гарант освітньої програми «Обладнання
переробних і харчових виробництв»

Цвіркун Л.О.
« » 2026 року

З А В Д А Н Я
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ ЗДОБУВАЧА ВИЩОЇ ОСВІТИ

Третяку Владиславу Вадимовичу
(прізвище, ім'я, по-батькові)

1. Тема кваліфікаційної роботи: «Удосконалення обладнання для теплової обробки молока»

Керівник роботи к.т.н., доцент, Омельченко О.В.
(науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали)

Затверджено: наказом ректора Криворізького національного університету від
«31» грудня 2025 р. № 85-с.

2. Строк подання здобувачем ВО роботи « 12 » червня 2026 р.

3. Вихідні дані до роботи:

1. Технічна документація до устаткування.
2. Монографії, наукові статті, автореферати дисертацій, тези доповідей на наукові конференції.
3. Навчальна і методична література, інформація мережі Інтернет.

4. Зміст пояснювальної записки:

1. Вступ.
2. Аналіз обладнання для теплової обробки молока.
3. Оптимізація пластинчастого теплообмінника для пастеризації молока.
4. Аналіз результатів досліджень.
5. Висновки.

6. Список використаних джерел.

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

Обладнання для теплової обробки молока.

Оптимізація геометрії шевронної пластини.

Удосконалена система процесу пастеризації молока.

Моделювання системи нагрівання/охолодження молока.

6. Дата видачі завдання «02» січня 2026 р.

7. Календарний план

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи
1	Вступ	05.01.2026-15.02.2026
2	Аналіз обладнання для теплової обробки молока	16.02.2026-10.03.2026
3	Оптимізація пластинчастого теплообмінника для пастеризації молока	11.03.2026-15.04.2026
4	Аналіз результатів досліджень	16.04.2026-30.04.2026
5	Висновки по роботі	01.05.2026-12.05.2026
6	Оформлення роботи і подання до захисту	16.05.2026-12.06.2026

Здобувач вищої освіти

(підпис)

Третяк В.В.
(прізвище та ініціали)

Керівник роботи

(підпис)

Омельченко О.В.
(прізвище та ініціали)

РЕФЕРАТ

Обсяг і структура бакалаврської роботи. Повний обсяг бакалаврської роботи – 50 сторінок, в тому числі основного тексту – 47 сторінки. Робота містить 11 рисунків, 1 таблицю. Список використаних джерел складається з 18 найменувань.

Об'єкт роботи – пластинчастий пастеризатор.

Предмет роботи – процес пастеризації молока.

Мета роботи – удосконалення обладнання для теплової обробки молока.

У роботі зазначено, що продукти молочної промисловості високої якості є джерелом необхідних поживних речовин у вигляді здорової та поживної сировини, яка поступово стає все більш затребуваною у світі. Молоко є найпотрібнішим і невід'ємним компонентом усіх молочних продуктів, що містить речовини, необхідні для щоденного харчування людини. Якість і термін зберігання молока покращуються шляхом пастеризації та охолодження, що знищує шкідливі мікроорганізми. Головною метою застосування тепла є збереження молока та молочних продуктів.

На основі аналізу, було зазначено, що пастеризація – критичний процес для знищення шкідливих мікроорганізмів у продуктах харчування, який значною мірою залежить від теплообмінників. Теплообмінники забезпечують точний контроль температури та рівномірний нагрів, що є ключовим для ефективної пастеризації молочної сировини.

Запропоновано оптимізовану систему процесу пастеризації молока, яка ґрунтується на таких аспектах:

По-перше, для досягнення покращення теплообміну в пластинчастому теплообміннику для пастеризації молока удосконалено конструкцію шевронної пластини, яка поєднує пластини з різними кутами для збільшення коефіцієнта теплопровідності, а саме 60° і 30° відповідно. Модернізація геометричних параметрів рельєфу дозволить штучно турбулізувати потік рідини запобігаючи утворенню відкладень.

По-друге, для уникнення небажаного забруднення підтримується пастеризоване молоко під вищим тиском, ніж сире молоко у процесі пастеризації. Задля цього встановлено додаткове обладнання, а саме:

- насос для подачі, який встановлений між балансувальним баком і зоною сирої регенерації і працювати лише тоді, коли працює підсилювальний насос;
- відцентрований насос розташований перед зоною нагрівання в пастеризаторі;
- напірний насос використовується для відцентрового насоса, розташованого між двома послідовними зонами регенерації пастеризатора.

Здійснено моделювання процесу нагрівання і охолодження молока у SolidWorks для стандартної пластини теплообмінника типу «шеврон» та для удосконаленої геометрії пластини. Результати свідчать, що удосконалена система на основі поєднання пластин теплообмінника з різними кутами ефективно знижує температуру молока з 60°C до 4°C .

КЛЮЧОВІ СЛОВА: пастеризатор, пластинчастий пастеризатор, теплообмінник, пластина теплообмінника, насос, моделювання, молоко.

					ННІЕТ КНУ.133.ГМБ-22.2026.ПЗ	Арк.
						4
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ЗМІСТ

ВСТУП	6
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ ТЕПЛОВОЇ ОБРОБКИ МОЛОКА	7
1.1 Методи теплової обробки молока	7
1.2 Теплообмінники у процесі пастеризації молока	12
1.3 Класифікація пластинчастих теплообмінників	14
РОЗДІЛ 2. ОПТИМІЗАЦІЯ ПЛАСТИНЧАСТОГО ТЕПЛООБМІННИКА ДЛЯ ПАСТЕРИЗАЦІЇ МОЛОКА	22
2.1 Механізми теплообміну в пластинчастому теплообміннику	22
2.2 Оптимізація геометрії пластини теплообмінника типу «шеврон»	26
3.3 Удосконалення системи процесу пастеризації молока	32
РОДІЛ 3. АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕНЬ	38
3.1 Вплив пастеризації на харчову цінність та сенсорні властивості рідких продуктів	38
3.2 Моделювання пластини теплообмінника типу «шеврон»	40
ВИСНОВКИ	44
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	46
ДОДАТКИ	47

					ННІЕТ КНУ.133.ГМБ-22.2026.ПЗ			
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	Удосконалення обладнання для теплової обробки молока	Літ.	Арк.	Аркушів
Розроб.		Третяк						
Перевір.		Омельченко					5	1
Н. Контр.		Омельченко				ННІЕТ КНУ Кафедра ЗІДО		
Затверд.		Цвіркун						

ВСТУП

Актуальність роботи. У роботі зазначено, що продукти молочної промисловості високої якості є джерелом необхідних поживних речовин у вигляді здорової та поживної сировини. Молоко є найпотрібнішим і невід’ємним компонентом усіх молочних продуктів, що містить речовини, необхідні для щоденного харчування людини. Якість і термін зберігання молока покращуються шляхом пастеризації та охолодження, що знищує шкідливі мікроорганізми.

Мета та задачі дослідження. Удосконалення обладнання для теплової обробки молока.

Практична та наукова новизна. На основі аналізу, було зазначено, що пастеризація – критичний процес для знищення шкідливих мікроорганізмів у продуктах харчування, який значною мірою залежить від теплообмінників. Теплообмінники забезпечують точний контроль температури та рівномірний нагрів, що є ключовим для ефективної пастеризації молочної сировини. Для досягнення покращення теплообміну, необхідно враховувати два важливі фактори: ступінь теплопередачі та падіння тиску, тому необхідно збільшити теплообмін і зменшити падіння тиску в теплообміннику.

Запропоновано оптимізовану систему процесу пастеризації молока, яка ґрунтується на таких аспектах:

По-перше, для досягнення покращення теплообміну в пластинчастому теплообміннику для пастеризації молока удосконалено конструкцію шевронної пластини, яка поєднує пластини з різними кутами для збільшення коефіцієнта теплопровідності, а саме 60° і 30° відповідно. Модернізація геометричних параметрів рельєфу дозволить штучно турбулізувати потік рідини запобігаючи утворенню відкладень.

По-друге, для уникнення небажаного забруднення підтримується пастеризоване молоко під вищим тиском, ніж сире молоко у процесі пастеризації. Задля цього встановлено додаткове обладнання, а саме:

- насос для подачі, який встановлений між балансувальним баком і зоною сирі регенерації і працювати лише тоді, коли працює підсилювальний насос;
- відцентрований насос розташований перед зоною нагрівання в пастеризаторі;
- напірний насос використовується для відцентрового насоса, розташованого між двома послідовними зонами регенерації пастеризатора.

Здійснено моделювання процесу нагрівання і охолодження молока у SolidWorks для стандартної пластини теплообмінника типу «шеврон» та для удосконаленої геометрії пластини. Результати свідчать, що удосконалена система на основі поєднання пластин теплообмінника з різними кутами ефективно знижує температуру молока з 60°C до 4°C .

					ННІЕТ КНУ.133.ГМБ-22.2026.ПЗ								
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата									
Розроб.		Третяк			Удосконалення обладнання для теплової обробки молока				Літ.	Арк.	Аркуші		
Перевір.		Омельченко									6	1	
									ННІЕТ КНУ Кафедра ЗІДО				
Н. Контр.		Омельченко											
Затверд.		Цвіркун											

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ ТЕПЛОВОЇ ОБРОБКИ МОЛОКА

1.1. Методи теплової обробки молока

Молоко є життєво важливим компонентом світової харчової промисловості при цьому структура його споживання значно відрізняється в різних регіонах. Продукти молочної промисловості високої якості є джерелом необхідних поживних речовин у вигляді здорової та поживної сировини, яка поступово стає все більш затребуваною у світі. Молоко є найпотрібнішим і невід'ємним компонентом усіх молочних продуктів, що містить різні поживні речовини, необхідні для щоденного харчування людини. Такий значний попит створює суттєвий тиск на молочну промисловість, змушуючи підтримувати високі стандарти ефективності, якості продукції та сталого розвитку.

Критично важливим етапом у переробці молока є швидке охолодження відразу після збору, що є необхідним для збереження свіжості, забезпечення безпеки харчових продуктів та дотримання суворих санітарних норм. Якість і термін зберігання молока покращуються шляхом пастеризації та охолодження, що знищує шкідливі мікроорганізми. Головною метою застосування тепла є збереження молока та молочних продуктів [7, 8]. Метою теплової обробки є дотримання вимог громадського здоров'я, таких як пастеризація та стерилізація, видалення води, руйнування ферментів, полегшення процесів змішування та поєднання, наприклад, у суміші для морозива, у переробленому сирі та ферментованих молочних продуктах, а також надання бажаних властивостей, таких як розвиток смакових якостей.

Щоб усунути потенційно шкідливі мікроорганізми, які можуть міститися в молочній сировині застосовується процес пастеризації – нагрівання рідких харчових продуктів до певної температури і утримання їх на цій температурі протягом визначеного часу. З метою підвищення безпеки та терміну зберігання різних рідких харчових продуктів, таких як молоко, соки, пиво та вино, пастеризація часто використовується в харчовій промисловості. Потреба в пастеризації рідких продуктів обумовлена тим фактом, що ці продукти можуть містити шкідливі мікроорганізми, які можуть викликати захворювання при споживанні. Пастеризація молока знищує ці шкідливі бактерії і робить молоко безпечним для споживання [7, 13-14]. Подібно до цього, фруктові соки та інші напої також можуть містити шкідливі мікроорганізми. Пастеризація цих продуктів знищує будь-які наявні збудники та продовжує термін їхнього зберігання, запобігаючи псуванню, спричиненому ростом бактерій. Окрім забезпечення безпеки харчових продуктів, пастеризація також допомагає зберегти харчову цінність рідких продуктів. Використовуючи певні параметри

					ННІЕТ КНУ.133.ГМБ-22.2026.ПЗ							
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата								
Розроб.		Третяк			Удосконалення обладнання для теплової обробки молока				Лім.	Арк.	Аркушів	
Перевір.		Омельченко									7	15
Н. Контр.		Омельченко										
Затверд.		Цвіркун			ННІЕТ КНУ Кафедра ЗІДО							

температури та часу, пастеризація може усунути небезпечні мікроорганізми, зберігаючи при цьому харчову цінність, смак та текстуру продукту. Щоб гарантувати безпеку та якість рідких харчових продуктів, зменшити ризик виникнення харчових інфекцій та продовжити термін зберігання цих продуктів, пастеризація є надзвичайно важливим процесом.

Залежно від методу нагрівання рідкого харчового продукту, методи пастеризації можна загалом поділити на теплові та нетеплові. Методи теплової пастеризації використовують тепло для знищення шкідливих мікроорганізмів у продукті. Ці методи додатково класифікуються на методи низькотемпературної та високотемпературної пастеризації. Низькотемпературна пастеризація – пастеризація при низькій температурі протягом тривалого часу, що є методом зменшення кількості шкідливих мікроорганізмів у рідких харчових продуктах. Цей процес зазвичай використовується в молочній промисловості для пастеризації молока, вершків та інших молочних продуктів. Під час низькотемпературної пастеризації рідина нагрівається непрямим способом, зазвичай шляхом пропускання її через теплообмінник, де вона нагрівається гарячою водою або паром [7, 8, 10]. Нагріта рідина потім утримується при потрібній температурі необхідний час, після чого швидко охолоджується, щоб запобігти подальшому пошкодженню теплом. Після пастеризації рідина зазвичай розливається в стерильні контейнери та зберігається в холодильнику до готовності до розповсюдження. Низькотемпературна пастеризація є ефективним методом зменшення кількості шкідливих мікроорганізмів у рідких харчових продуктах при мінімальному впливі на їх харчову цінність та сенсорні властивості. Проте триваліший час нагрівання та нижча температура, необхідні для цього методу, можуть призвести до більшого споживання енергії та вищих виробничих витрат порівняно з іншими методами пастеризації.

Високотемпературна пастеризація є поширеним методом, який використовується в харчовій промисловості для зменшення кількості шкідливих мікроорганізмів у рідинах, таких як молоко, соки та інші напої. Процес полягає в нагріванні рідини до високої температури на короткий час. Спочатку рідину попередньо нагрівають до температури близько 60°C перед тим, як подати її в утримувальну трубку, де її нагрівають до потрібної температури за допомогою гарячої води або пари [7, 10]. Утримувальна трубка підтримує рідину на цій температурі протягом потрібного часу, після чого її швидко охолоджують, щоб запобігти подальшому термічному ушкодженню. Після пастеризації рідину зазвичай упаковують у стерильні контейнери, щоб запобігти повторному зараженню залишковими мікроорганізмами. Даний вид пастеризації є ефективним методом зменшення кількості шкідливих мікроорганізмів у рідких харчових продуктах, одночасно мінімізуючи шкоду для якості та харчової цінності продукту.

Пакетний пастеризатор – це тип обладнання для пастеризації, що обробляє фіксовану кількість рідини за один раз, зазвичай у партіях від кількох галонів до кількох сотень галонів. Основний принцип роботи пакетного пастеризатора включає наступні етапи [7]:

					ННІЕТ КНУ.133.ГМБ-22.2026.ПЗ	Арк.
						8
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Наповнення: рідкий продукт, який підлягає пастеризації, спочатку наповнюється в бак пастеризатора. Розмір партії та рівень наповнення визначаються заздалегідь відповідно до місткості бака.

Нагрівання: після наповнення бака починається нагрівання для підвищення температури рідини до бажаної температури пастеризації. У пакетних пастеризаторах нагрівання зазвичай здійснюється за допомогою непрямих методів нагріву, таких як парові рубашки, гаряча вода або електричні нагрівальні елементи. Процес нагрівання ретельно контролюється, щоб забезпечити досягнення та підтримання необхідної температури протягом рекомендованого часу.

Утримування: після того як рідина нагріта до бажаної температури, її підтримують при цій температурі протягом заздалегідь визначеного часу, щоб забезпечити знищення всіх шкідливих мікроорганізмів. Час утримування залежить від типу продукту та використовуваного методу пастеризації.

Охолодження: після завершення часу утримування рідину охолоджують до бажаної температури за допомогою холодної води або охолоджувальної рубашки. Процес охолодження також ретельно контролюється, щоб досягти необхідної температури.

Вивантаження: пастеризована рідина вивантажується з бака в стерильний контейнер або систему пакування.

Пакетні пастеризатори зазвичай використовуються для менших обсягів виробництва та для продуктів з коротшим терміном зберігання. Їх часто застосовують у молочній промисловості, ремісничому пивоварінні та малих харчових виробництвах.

При високотемпературній пастеризації насос спочатку перекачує молоко з резервуара постійного рівня у теплообмінник, де воно нагрівається приблизно до 60°C за допомогою пастеризованого молока. Це називається регенеративним нагрівачем, оскільки сире молоко нагрівається за допомогою пастеризованого молока і не використовується зовнішнє джерело тепла. Регенератор знижує фактичну кількість тепла, необхідну для пастеризації, що робить його важливим для загальної економічної ефективності системи [7]. Потім молоко подається в нагрівач, де воно нагрівається до необхідної температури пастеризації, щоб завершити процес пастеризації (рис. 1.1).

Далі молоко проходить через утримувач, де воно витримується протягом необхідного часу. Пастеризоване молоко потім подається у регенератор, де воно нагріває сире молоко. Щоб уникнути потреби у охолодженні, його також одночасно охолоджують. Після проходження через регенератор пастеризоване молоко потрапляє в охолоджувач, де охолоджується приблизно до 4-5°C. Наступні елементи контролю є ключовими для пастеризації при високій температурі: регулювання витрати, температура та тиск [7, 8]. Витрату контролює лічильний або таймерний насос. Використовується роторний або поршневий насос із примусовим переміщенням. Часто застосовують приводи змінної швидкості для регулювання витрати відповідно до потреби. Насос повинен бути правильно підібраний та керований так, щоб витрата не перевищувала фактичну, або час утримання не був менший за мінімально

необхідний за законом. Підтримання рівномірної температури продукту на рівні або вище законодавчо встановленого мінімуму та на безпечному рівні включає методи контролю температури. Регулювання тиску є важливою проблемою, бо є різні причини та наслідки проблем, пов'язаних із тиском, у системі пастеризації. Деякі проблеми з тиском регенератора вирішуються за допомогою центробіжного підсилювального насоса. Крім того, є ще три компоненти: синхронний насос, реле тиску та обмежувач.

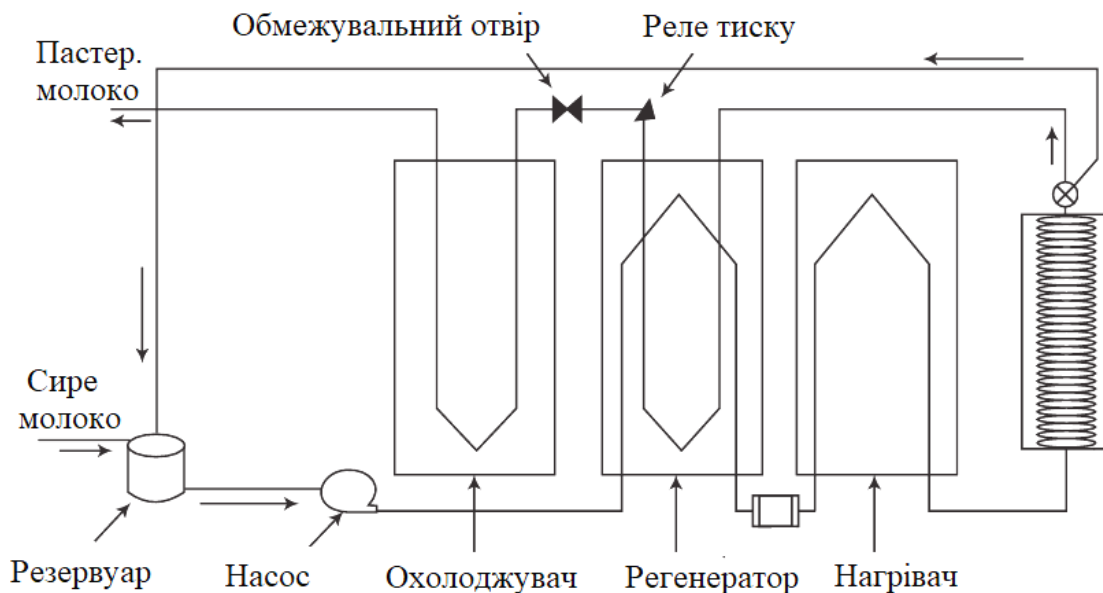


Рисунок 1.1 – Високотемпературна пастеризаційна установка

Синхронний насос – пристрій, що забезпечує, щоб пастеризована сторона регенератора завжди мала більший тиск, ніж сире молоко. Реле тиску – пристрій, що дозволяє насосу працювати лише тоді, коли тиск на стороні пастеризованого продукту менше, ніж на стороні сирого молока. Обмежувач – якщо охолоджувальна частина не створює достатнього зворотного тиску на стороні пастеризованого молока, цей додатковий пристрій забезпечує необхідну мінімальну різницю тисків [7]. Крім запису температури молока, термальний реєстратор також контролює, записує та регулює роботу клапана перенаправлення потоку. Якщо час утримання під час перенаправленого потоку коротший, ніж під час прямого потоку, у лінії перенаправлення слід встановити обмежувальний отвір. Інше управління тиском у лінії перенаправленого молока необхідне, оскільки воно може впливати на час утримання під час перенаправлення.

Розглянемо деякі види пастеризації [7, 8]:

Безперервна пастеризація є більш економічною за часом і енергією. Високі темпи пропускання, гнучкість для різних типів продуктів, рівномірна термічна обробка, підвищена енергетична економія, а також контроль і автоматизація умов пастеризації – ці характеристики притаманні цьому методу. Можна підігрівати безперервно безпосередньо або опосередковано. У прямому методі нагрівальний агент (пар) вводиться безпосередньо в продукт (парова

ін'єкція) або продукт подається у пар (інфузія). У непрямому методі тепло передається через поверхню між продуктом і нагрівальним агентом. Пряме та непряме нагрівання – це два методи, які використовуються при пастеризації для прогрівання та знищення шкідливих мікроорганізмів у рідких харчових продуктах. Основна відмінність між цими методами полягає в тому, як тепло передається продукту, що пастеризується.

Пряме нагрівання передбачає безпосереднє впливання джерела тепла на рідкий продукт. У цьому методі пар або гаряча вода вводяться в рідину, а тепло передається через прямий контакт між джерелом тепла та рідиною. Метод часто використовується при пакетній пастеризації, коли рідину нагрівають у баку або чані, а потім швидко охолоджують, щоб уникнути переварювання або погіршення якості продукту. Впорскування пару є методом прямого нагрівання, що використовується при пастеризації рідких продуктів харчування, і передбачає введення пару в рідкий продукт для пастеризації. Пар вводиться безпосередньо в потік продукту або в теплообмінник для передачі тепла продукту [7]. Коли пар конденсується на холоднішому продукті, виділяється тепло, що підвищує температуру продукту до необхідного стандарту пастеризації. Галузь харчових продуктів та напоїв широко застосовує впорскування пару через його енергоефективність, швидке нагрівання, рівномірне прогрівання, чистоту та універсальність. Цю техніку можна використовувати як для пакетних, так і для безперервних систем пастеризації і вона часто застосовується при пастеризації молочних продуктів, соків та соусів. Однак початкові витрати на обладнання та встановлення для впорскування пару можуть бути вищими, ніж у випадку інших методів нагрівання, і потребується регулярне технічне обслуговування, щоб запобігти корозії та накопиченню відкладень.

Парова пастеризація методом інфузії є методом пастеризації, що передбачає пряме введення пари у рідкий харчовий продукт для створення турбулентного потоку, який швидко та короткочасно підвищує температуру продукту до необхідного рівня. Вона залишається особливо ефективною для рідких продуктів із високою в'язкістю, таких як пюре, соуси та супи, а також продукти, що містять частинки. Вона має кілька переваг порівняно з традиційними методами термічної пастеризації, таких як скорочення часу обробки, підвищення ефективності виробництва та зниження енергетичних витрат. Крім того, вона використовує менше води, ніж традиційна пастеризація, що сприяє зменшенню витрат води та виробництва стічних вод і мінімізує вплив виробничого процесу на навколишнє середовище. Однак ін'єкція пари під високим тиском може створювати механічне навантаження на продукт, що може вплинути на його текстуру або структуру.

Непряме нагрівання, навпаки, передбачає нагрівання рідини опосередковано за допомогою теплообмінника. У цьому методі рідина проходить через трубний або пластинчастий теплообмінник, де вона контактує з нагрітою поверхнею, такою як пара або гаряча вода. Через стінку теплообмінника тепло передається від нагрітої поверхні до рідини, без прямого контакту рідини з джерелом тепла. Метод широко використовується у процесах

					ННІЕТ КНУ.133.ГМБ-22.2026.ПЗ	Арк.
						11
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

безперервної пастеризації. У процесі пастеризації використовуються пластинчасті та трубчасті теплообмінники.

1.2. Теплообмінники у процесі пастеризації молока

Теплообмінники широко використовуються в харчовій промисловості та виробництві напоїв, особливо в таких процесах, як нагрівання, охолодження, пастеризація та дезінфекція. Вони регулюють температуру, гарантуючи, що фізичні та хімічні реакції відбуваються в оптимальних умовах, гарантуючи при цьому безпечний кінцевий продукт для споживання людиною [4, 5, 9]. Пластинчасті теплообмінники є одними з найбільш широко використовуваних теплообмінників для молочної промисловості, оскільки конструкція цього обладнання забезпечує велику площу теплообміну, що значно підсилює турбулентність при одночасному поліпшенні показників теплопередачі. Крім того, оскільки пластинчасті теплообмінники можна легко збирати та розбирати, процеси обслуговування та очищення є дуже практичними, що важливо в галузях, які вимагають високих стандартів гігієни.

У молочної промисловості пластинчасті теплообмінники, зокрема багатоступінчасті, широко використовуються при пастеризації молока, попередньому охолодженні та сепарації вершків тощо. Він відповідає гігієнічним стандартам харчового класу, що гарантує безпеку та чистоту обробки. Оскільки молоко є дуже швидкопсувним продуктом, пастеризація має важливе значення для забезпечення мікробної безпеки продукту, не впливаючи при цьому на його смак і поживну цінність. Це також вимагає дотримання деяких із найсуворіших промислових стандартів і правил. Ефективна пастеризація вимагає ретельного регулювання температури, а використання пластинчастих теплообмінників може не тільки забезпечити промислові стандарти, але й підвищити енергоефективність під час виробництва.

Багатоступінчасті пластинчасті теплообмінники трансформують пастеризацію молока, значно покращуючи енергоефективність, гігієну та контроль температури. Їх компактний дизайн, високі теплові характеристики та простота обслуговування роблять їх ідеальними для сучасної переробки молочних продуктів [9]. Багатоступеневий пластинчастий теплообмінник також є різновидом теплообмінника з прокладкою. Він може використовуватися для нагрівання та охолодження двох або більше рідин, зазвичай розділених проміжною рамою, і може виготовлятися на 2-ступеневий, 3-ступеневий, 4-ступеневий тощо. Проміжна рамка має з'єднання для циркуляції носіїв. Процес пастеризації молока в багатоступінчастому пластинчастому теплообміннику:

1. Попередній підігрів (зона регенерації). Холодне молоко спочатку пропускають через теплообмінник для отримання теплової енергії з гарячого молока, яке вже було пастеризоване, попередньо нагріваючи його до температури, близької до температури пастеризації. Оскільки гаряче молоко в циклі пастеризації протікає через теплообмінник, воно передає тепло холодному молоку, що надходить. Процес зменшує кількість енергії, необхідної для нагрівання молока до температури пастеризації, і є ключовою

					ННІЕТ КНУ.133.ГМБ-22.2026.ПЗ	Арк.
						12
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

демонстрацією здатності системи пластинчастих теплообмінників до рекуперації тепла. Різниця температур між гарячою рідиною та холодним молоком, а також контроль швидкості потоку є центральними для оптимізації теплової ефективності.

2. Пастеризація (зона нагріву). Це критичний етап для знищення шкідливих бактерій. На цьому етапі молоко додатково нагрівається до необхідної температури пастеризації, зазвичай 72°C, протягом 15 секунд відповідно до методу високої температури короткого часу, щоб перейти у фазу стерилізації. Теплоносій, зазвичай гаряча вода або пара, передає тепло через іншу сторону пластини теплообмінника для точного та рівномірного регулювання температури. Необхідно забезпечити постійну швидкість потоку та рівномірний розподіл температури, щоб запобігти перегріву або недостатній стерилізації.

3. Утримання (утримуюча труба). Після досягнення цільової температури молоко потрібно підтримувати в трубці для зберігання протягом певного періоду (наприклад, високотемпературна пастеризація при 72°C протягом 15 секунд), щоб забезпечити достатнє тепло для завершення процесу стерилізації. Системи пластинчастих теплообмінників також можуть використовуватися з рекуперацією тепла на цьому етапі для підвищення енергоефективності. Ключові змінні включають швидкість потоку та тривалість у зоні зберігання для дотримання вимог безпеки харчових продуктів та забезпечення знищення патогенів.

4. Охолодження (зона охолодження). Після стерилізації молоко необхідно швидко охолодити до температури нижче 4°C, щоб пригнічувати регенерацію мікроорганізмів, щоб забезпечити свіжість і продовжити термін зберігання. У цей момент теплообмінник швидко знижує температуру молока за допомогою охолоджуючого середовища (наприклад, охолодженої води або іншого охолоджуючого середовища). Такі фактори, як різниця температур між молоком і охолоджуючою рідиною та ефективність теплопередачі, а також теплообмінна здатність безпосередньо впливають на швидкість охолодження.

Багатоступеневий пластинчастий теплообмінник суттєво зменшує споживання пари та гарячої води в процесі пастеризації молока, ефективно відновлюючи теплову енергію через регенераційний сектор, мінімізуючи енерговитрати та підвищуючи загальну економічну ефективність. Водночас система оптимізує енергетичну ефективність ступенів нагрівання та охолодження, що не лише покращує продуктивність, а й допомагає зменшити викиди вуглецю. Це важливо для молочної промисловості для досягнення цілей енергозбереження, скорочення викидів та сталого розвитку [9]. Застосування багатоступеневих пластинчастих теплообмінників у пастеризації молока не лише покращує теплову ефективність і операційну гнучкість, а й знижує енергоспоживання та експлуатаційні витрати, водночас забезпечуючи стандарти безпеки та гігієни продуктів харчування. У міру того, як концепція сталого виробництва продовжує поглиблюватися, технології теплообмінників продовжують розвиватися у напрямку підвищення ефективності, автоматизації та захисту довкілля, додаючи новий імпульс зеленій трансформації молочної

					ННІЕТ КНУ.133.ГМБ-22.2026.ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		13

промисловості. Як передове енергозберігаюче обладнання, багатоступеневі пластинчасті теплообмінники не лише допомагають компаніям відповідати регуляторним вимогам галузі, а й задовольняють попит споживачів на якісні, сталий молочний продукт, що є важливим кроком до майбутнього харчової промисловості.

1.3 Класифікація пластинчастих теплообмінників

Пластинчасті теплообмінники широко використовуються в харчовій промисловості через їх ефективність у передачі тепла, легкість очищення та придатність для різних застосувань. Вони сприяють проведенню процесів нагрівання, охолодження, пастеризації та стерилізації, що є важливими для безпеки та якості харчових продуктів [1-5]. Теплопередача у найпростішому вигляді – це переміщення тепла з одного місця в інше, а процес передачі тепла між двома або більше потоками рідини при різних температурах здійснюється за допомогою спеціально розробленого обладнання, відомого як теплообмінники.

Пластинчасті теплообмінники є фундаментальними в процесах нагрівання та охолодження у харчовій промисловості. Вони ефективно передають тепло між двома рідинами з різними температурами, що є ключовим для таких операцій, як попередній нагрів та охолодження харчових продуктів. У молочній промисловості пластинчасті теплообмінники використовуються для охолодження молока після пастеризації, забезпечуючи його швидке досягнення безпечної температури для зберігання. Швидке охолодження запобігає росту мікроорганізмів, продовжуючи термін придатності продукту.

Пастеризація – критичний процес для знищення шкідливих мікроорганізмів у продуктах харчування, значною мірою залежить від теплообмінників. Молоко, сік та інші рідкі продукти швидко нагріваються, а потім охолоджуються до певних температур, щоб знищити патогени, зберігаючи їхню харчову цінність. Теплообмінники забезпечують точний контроль температури та рівномірний нагрів, що є ключовим для ефективної пастеризації [1-5]. Стерилізація – це більш інтенсивна теплова обробка, ніж пастеризація, також здійснюється за допомогою пластинчастих теплообмінників. Цей процес усуває всі життєздатні мікроорганізми, значно продовжуючи термін придатності продуктів. Стерилізація ультрависокою температурою, що часто застосовується для молока та інших напоїв, передбачає нагрівання продукту до дуже високої температури протягом короткого часу, а потім швидке охолодження, все це в системі пластинчастого теплообмінника.

Пластинчастий теплообмінник складається з пакета тонких прямокутних пластин з люками, через які протікають два потоки рідини, де відбувається теплопередача. Інші компоненти включають плиту каркаса (фіксовану плиту), плиту тиску (рухома плита), верхні та нижні планки і гвинти для стиснення пакета пластин (рис. 1.2). Окремий пластинчастий теплообмінник може вміщувати до 700 пластин [3]. Коли пакет пластин стискається, отвори в кутах пластин утворюють суцільні канали або розподільники, через які проходять

рідини, рухаючись через пакет пластин і виходячи з обладнання. Простори між тонкими пластинами теплообмінника утворюють вузькі канали, через які по черзі проходять гарячі та холодні рідини, і забезпечують невеликий опір передачі тепла.

Найважливішою та найдорожчою частиною пластинчастого теплообмінника є його теплові пластини, які виготовляються з металу, металевого сплаву або навіть спеціальних графітових матеріалів, залежно від застосування. Нержавіюча сталь, титан, нікель, алюміній – це деякі приклади, що часто зустрічаються у промислових застосуваннях. Пластини можуть бути плоскими, але в більшості випадків мають гофровану поверхню, що суттєво впливає на теплово-гідравлічні характеристики пристрою. Канали, що утворюються між суміжними пластинами, надають потоку рідин закрученого руху [3]. Кут шеврону чергується в суміжних пластинах, так що при закручуванні пластин гофри забезпечують численні точки контакту, які підтримують обладнання. Герметизація пластин досягається за допомогою прокладок, встановлених на їх кінцях. Прокладки зазвичай виготовляються з формованих еластомерів, обраних залежно від сумісності з робочою рідиною та умов температури і тиску. Можливо впровадження багатопрхідної схеми в залежності від розташування прокладок між пластинами.

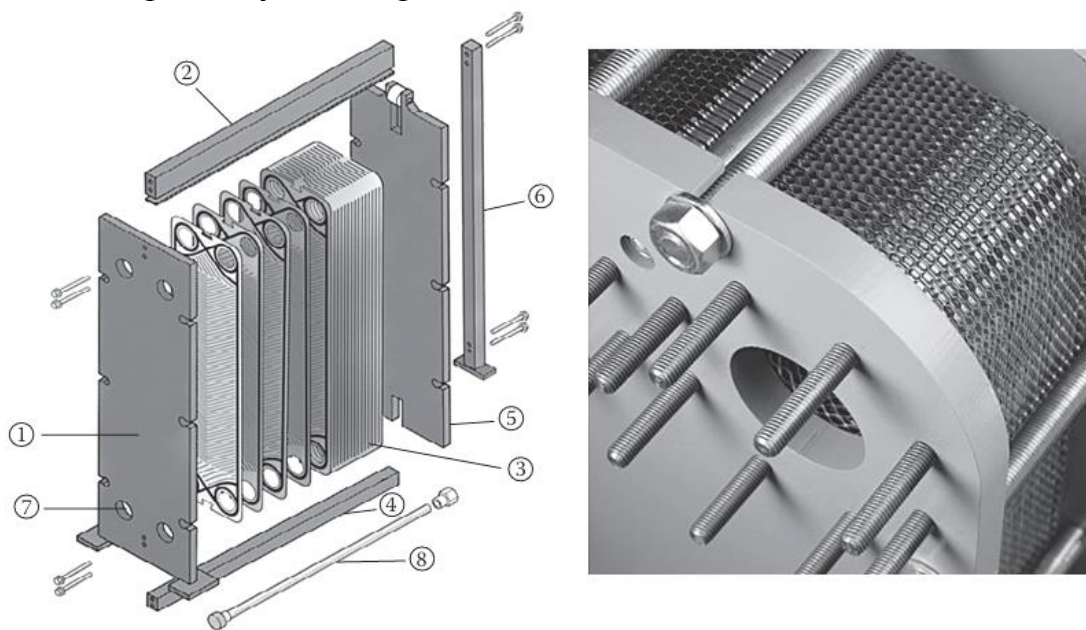


Рисунок 1.2 – Пластинчастий теплообмінник

Деталі конструкції: 1 – пластина нерухомої рами, 2 – верхня несуча балка, 3 – пакет пластин, 4 – нижня несуча балка, 5 – зрушувана притискна плита, 6 – опорна колона, 7 – вхід/вихід рідин, 8 – затискні болти.

Переваги пластинчастого теплообмінника [3]:

– гнучкість: простий розбір дозволяє адаптувати пластинчасті теплообмінники до нових вимог процесу шляхом додавання або видалення пластин, або зміни кількості проходів. Крім того, різноманітність візерунків гофрування пластин, разом із можливістю їх комбінованого використання в одному пластинчастому теплообміннику означає, що під час оптимізаційних

операцій можна випробувати різні конфігурації обладнання;

- контроль температури: через вузькі канали, що утворюються між сусідніми пластинами, у пластинчастому теплообміннику міститься лише невеликий об'єм рідини. Тому пристрій швидко реагує на зміни умов процесу, з короткими затримками, що дозволяє легко контролювати температуру. Це особливо важливо, коли необхідно уникати високих температур. Крім того, форма каналів зменшує ймовірність утворення застійних зон (мертвих просторів) та областей перегріву;

- низька вартість виробництва: оскільки пластини тільки пресуються (або склеюються) між собою, а не зварюються, виробництво плівково-пластинчастих теплообмінників може бути відносно недорогим. Для виготовлення пластин можуть використовуватися спеціальні матеріали, щоб зробити їх більш стійкими до корозії та/або хімічних реакцій;

- ефективний теплообмін: рифлення пластин та невеликий гідравлічний діаметр сприяють утворенню турбулентного потоку, завдяки чому можна досягти високих швидкостей теплообміну для рідин. В результаті можна відновити до 90% тепла, порівняно лише з 50% у випадку трубчастих теплообмінників;

- компактність: висока теплова ефективність означає, що вони займають дуже мало місця. Для тієї ж площі теплообміну часто займають на 80% менше площі підлоги (іноді у 10 разів менше), порівняно з трубчастими теплообмінниками;

- зменшення забруднення: зменшення забруднення досягається поєднанням високої турбулентності та короткого часу перебування рідини. Коефіцієнти масштабування для пластинчастих теплообмінників можуть бути до десяти разів меншими, ніж для трубчастих теплообмінників;

- легкість перевірки та очищення: оскільки компоненти пластинчастого теплообмінника можна розбирати, можливо очистити та перевірити всі частини, що контактують із рідинами. Ця особливість є важливою у харчовій та фармацевтичній промисловості;

- легке виявлення витоків: у прокладок є отвори, які запобігають змішуванню рідин у разі поломки, а також полегшують пошук витоків.

Пластинчасті теплообмінники мають кілька переваг завдяки своїй відповідній методології проектування, яка відносно дешева та проста у розбиранні під час технічного обслуговування. Крім того, пластинчасті теплообмінники можуть працювати з широким спектром рідин, а спеціальне збільшення площі поверхні завдяки численним гофрам пластини означає, що в невелику об'ємну ємність можна вмістити велику площу поверхні, що робить конструкцію компактною. Це означає, що пластинчасті теплообмінники є чудовим прикладом компактних теплообмінників завдяки ефективній поверхні теплопередачі з площею поверхні понад $700 \text{ м}^2/\text{м}^3$.

Недоліки пластинчастого теплообмінника [1-5]:

- температурні та тискові обмеження: важливим обмеженням пластинчастих теплообмінників є ущільнення плит. Тиски і температури, що перевищують відповідно 25 атм і 160°C , не допускаються, оскільки це може призвести до протікання стандартних ущільнень. Проте ущільнення з

					ННІЕТ КНУ.133.ГМБ-22.2026.ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		16

особливих матеріалів можуть витримувати температури до 400°C, і можливо зварювати або паяти плити між собою, щоб працювати за більш суворих умов. Це також давало б додаткові переваги у вигляді збільшення експлуатаційних меж і можливості роботи з агресивними рідинами, оскільки це усувало б потребу в ущільненнях;

– велика втрата тиску: через гофровані пластини та невеликий простір між ними падіння тиску через тертя є високим, що збільшує витрати на перекачування. Зниження падіння тиску можна досягти шляхом збільшення кількості проходів на один прохід і розподілу потоку на більшу кількість каналів. Це зменшує швидкість потоку в каналі, що, відповідно, знижує коефіцієнт тертя. Однак, коефіцієнт конвективного теплопередачі також знижується, що зменшує ефективність теплообмінника;

– фазова зміна: у спеціальних випадках можуть використовуватися для конденсації або випаровування, але не рекомендуються для газів та парів через обмежений простір у каналах та обмеження тиску;

– типи рідин: обробка рідин з високою в'язкістю або які містять волокнистий матеріал не рекомендується через високу втрату тиску та проблеми з розподілом потоку в пластинчастих теплообмінниках. Також слід враховувати сумісність рідини з матеріалом прокладки. Слід уникати сильно легкозаймистих або токсичних рідин через можливість витоку;

– утечка: тертя між металевими пластинами може спричинити знос і появу маленьких отворів, які важко виявити. Як запобіжний захід доцільно під тиском пропускати робочу рідину, щоб зменшити ризик забруднення у випадку витоку з пластини.

Пластинчасті теплообмінники є пристроями для передачі тепла, які використовуються для передавання тепла між різними потоками рідини при різних температурах. Теплообмінники зазвичай класифікують як теплообмінники прямого або непрямого контакту. У теплообміннику непрямого контакту потоки рідини залишаються окремими, а тепло передається безперервно через непроникну перегородку або у стінку і з неї в тимчасовому порядку. Таким чином, немає прямого контакту між термічно взаємодіючими рідинами. Цей тип теплообмінника, який також називають поверхневим теплообмінником, можна додатково класифікувати на теплообмінники прямого перенесення, накопичувальні та з псевдозрідженим шаром.

У теплообмінник прямого контакту тепло передається безперервно від гарячої рідини до холодної рідини через розділову стінку. Хоча для роботи теплообмінника потрібен одночасний потік двох (або більше) рідин, прямого змішування двох (або більше) рідин не відбувається, оскільки кожна рідина протікає окремими каналами. Загалом у більшості таких теплообмінників немає деталей, що рухаються. Цей тип теплообмінника називають рекуперативним теплообмінником або просто рекуператором [6]. Рекуператори додатково поділяються на теплообмінники з первинною поверхнею та теплообмінники з розширеною поверхнею. Теплообмінники з первинною поверхнею не використовують ребра чи розширену поверхню на будь-якій зі сторін потоку. Простими прикладами теплообмінників з первинною поверхнею є трубчасті теплообмінники, кожухотрунні теплообмінники з гладкими трубами та

					ННІЕТ КНУ.133.ГМБ-22.2026.ПЗ	Арк.
						17
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

пластинчасті теплообмінники. Рекуператори складають значну більшість усіх теплообмінників.

У теплообміннику прямого контакту немає проміжної поверхні між рідинами, і через це вони можуть досягати більш близьких температур зближення, тоді як теплообмінник непрямого контакту є пристроєм, який використовує передачу тепла між двома рідинами або між поверхнею й рідиною [1, 3]. Пластинчастий теплообмінник є чудовим прикладом теплообмінника непрямого контакту і складається з серії рифлених пластин, які формують сердечник, що покращує і проводить теплопередачу через пластини. Теплові пластини складаються з ущільнень, розташованих у спеціально сформованій канавці по периметру пластини, яка утримує рідину між пластинами. Найпростіші типи розташування пластинчастих теплообмінників – це ті, в яких обидві рідини проходять лише один раз, тому напрямки потоків не змінюються.

Пластинчасті теплообмінники працюють за тим же основним принципом, що й будь-який інший теплообмінник у якому відбувається передача тепла між двома або більше потоком рідини через розділяючу стінку. У випадку пластинчастого теплообмінника передача тепла відбувається через розділяючу стінку або пластину без змішування рідин, що протікають через пластини, і без витоків у навколишнє середовище завдяки використанню ущільнювачів, розташованих по краях пластин, які герметизують кожен блок [1]. Крім того, хвиляста структура пластин забезпечує відповідний потік рідини між пластинами і, таким чином, досягається максимальна ефективність теплопередачі. Існує кілька типів теплообмінників, які загалом класифікують за механізмом теплопередачі, розміром та формою.

Пластинчасті теплообмінники можна класифікувати залежно від їх конструкції та конкретного способу з'єднання пластин.

1. Пластинчасті теплообмінники з прокладками складаються із серії прямокутних гофрованих металевих або сплавних пластин, краї яких спеціально ущільнені прокладками та щільно закріплені в рамці. Конструкція добре продумана таким чином, що рамка має нерухому кришку з одного боку з підключеними портами та рухому кришку з іншого боку, яка може бути тисковою пластиною або задньою кришкою. Пластини зазвичай підвішуються у рамці на верхньому несучому гвинтовому стрижні, який надійно спрямовується нижнім несучим стрижнем, що підтримує та забезпечує правильне вирівнювання всього обладнання [1, 15]. Крім того, завдяки конструкції теплообмінника з прокладками, який має кілька рухомих частин, огляд та очищення плиток є легкодоступними, що можна робити так часто, як необхідно, для оптимізації функціональності обладнання. Прокладки добре взаємопов'язані та вбудовані в плитки, щоб запобігти виходу під високим перепадом тиску, оскільки конструкція прокладок показує, що вони можуть стискатися на приблизно 25% товщини у болтовому плитковому теплообміннику, що додатково забезпечує герметичне з'єднання без деформації тонких плит.

2. Зварні пластинчасті теплообмінники виготовляються шляхом зварювання пластин теплообміну на обох потоках – гарячому та холодному, що

					ННІЕТ КНУ.133.ГМБ-22.2026.ПЗ	Арк.
						18
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

значно знижує вартість зварювання всієї пластини (рис. 1.3). Зазвичай зварювання проводиться лазерним способом, при якому зварюється проміжок між пластинами у місцях, де зазвичай встановлюються прокладки у пластинчастому теплообміннику з прокладками і це зварювання проводиться по всьому периметру пластини [1]. Конструкція зварного пластинчастого теплообмінника сприяє використанню агресивних потоків рідини як гарячого так і холодного теплоносія, оскільки агресивна рідина не може пошкодити зварені гофровані металеві пластини, що використовуються як теплообмінні поверхні в цьому випадку. Зварні пластинчасті теплообмінники є компактними теплообмінниками, які дуже міцні та не мають ущільнень, тому вони здатні працювати за дуже високих температурних і тискових умов. Для виготовлення пластин використовуються нержавіюча сталь.

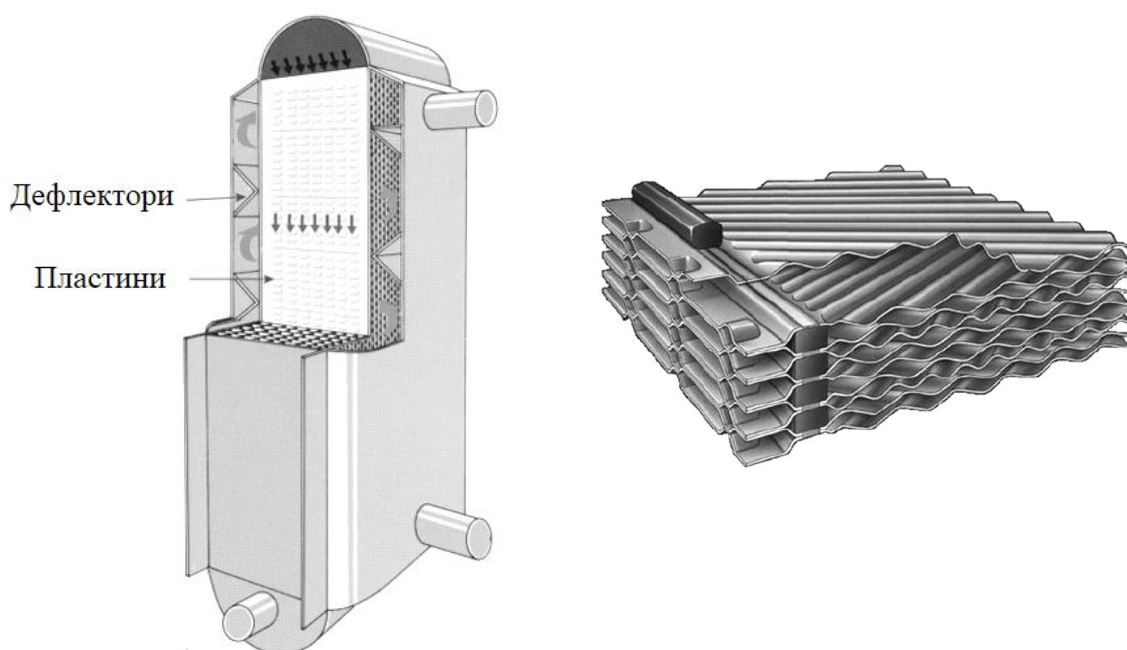


Рисунок 1.3 – Пластинчастий зварний теплообмінник
(пластинчастий переріз зварювального пластинчастого теплообмінника)

3. Паяний теплообмінник застосовується для роботи при високих температурах і тисках, і він не має ущільнень, затискних болтів, каркаса та несучих або направляючих стержнів. Він складається просто з нержавіючих сталевих пластин та двох кінцевих пластин, всі зазвичай паянні міддю, але нікелем для аміачних установок. Розмір пластини зазвичай обмежений до 0,3 м². Таку установку можна монтувати безпосередньо на трубопроводі без кронштейнів та фундаментів. Оскільки цей теплообмінник не може бути відкритий, його застосування обмежуються випадками з незначним забрудненням. Застосування включає водоохолодження випарники та конденсатори у холодильній промисловості, а також нагрівання технологічної води та рекуперацію тепла. Було розроблено ряд інших конструкцій пластинчастих теплообмінників для усунення деяких обмежень традиційних теплообмінників. Подвійний пластинчастий теплообмінник використовується для уникнення змішування двох рідин.

3. Спіральний пластинчастий теплообмінник складається з двох відносно довгих смуг листового металу, зазвичай оснащених зварними виступами для відстані між пластинами, які гвинтово обгортаються навколо розрізного оправлення, утворюючи пару спіральних каналів для двох рідин (рис. 1.4). Кожна рідина має довгий єдиний канал, розташований у компактному пакеті. Для завершення теплообмінника на кожному кінці встановлюються кришки. Для цього теплообмінника можна використовувати будь-який метал, який можна холодно формувати і зварювати. Найпоширенішими металами є вуглецева сталь і нержавіюча сталь [6, 15]. Основний спіральний елемент ущільнюється або зварюванням з обох боків каналу, або встановленням прокладки на кожній кришці для отримання наступних альтернативних схем руху двох рідин: 1 – обидві рідини в спіральному протитечії; 2 – одна рідина в спіральному потоці, інша в поперечному потоці крізь спіраль; або 3 – одна рідина в спіральному потоці, інша в комбінації поперечного та спірального потоків. Уся конструкція розміщується в циліндричній оболонці, закритій двома (або лише однією чи без) круглими кришками на кінцях (залежно від вищезгаданих схем потоку), які можуть бути плоскими або конічними. Вуглецева сталь і нержавіюча сталь є найпоширенішими матеріалами.

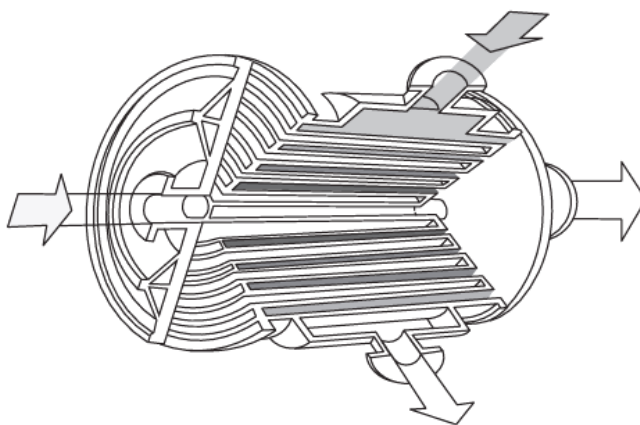


Рисунок 1.4 – Спіральний пластинчастий теплообмінник

4. Теплообмінник з паяними пластинами – це міцна конструкція пластинчастих теплообмінників, яка складається з гофрованих пластин, паяних у вакуумі при дуже високій температурі. Така конструкція створює компактне та герметичне обладнання, яке не потребує використання ущільнювачів. Конструкція є дуже простою, оскільки зазвичай вона менша за інші типи пластинчастих теплообмінників, що означає, що менший розмір зменшує кількість матеріалу і робить її одним із найбільш економічних теплообмінних обладнань [6, 15]. Дуже компактна конструкція паяних пластинчастих теплообмінників робить їх надзвичайно ефективними, легкими в установці та експлуатації порівняно з іншими типами теплообмінників. Паяний пластинчастий теплообмінник має дуже високу стійкість до корозії і може працювати з можна досягти температури від -195°C до 400°C при робочому тиску майже 50 бар. Паяні пластинчасті теплообмінники зазвичай очищають хімічним методом через їх компактну конструкцію, яка ускладнює розбирання

пластин для огляду та очищення. Вони широко використовуються в системах централізованого водяного опалення в установках енергетичних об'єктів, таких як чилери та компресори.

5. Ламельний теплообмінник складається з набору паралельно зварених тонких пластин, які утворюють прямокутний канал при розташуванні вздовж корпусу. Ламелі являють собою пари тонких плоских пластин, зазвичай оснащених ущільнювачами для запобігання витокам. Цей тип пластинчастого теплообмінника часто використовується в целюлозно-паперовій, хімічній промисловості для повернення технологічного тепла. Робочий тиск досягає 3,45 МПа, а температурні межі – від 200°C до 500°C.

На основі вище зазначеного можна вважати, що продукти молочної промисловості високої якості є джерелом необхідних поживних речовин у вигляді здорової та поживної сировини, яка поступово стає все більш затребуваною у світі. Молоко є найпотрібнішим і невід'ємним компонентом усіх молочних продуктів, що містить різні поживні речовини, необхідні для щоденного харчування людини. Критично важливим етапом у переробці молока є швидке охолодження відразу після збору, що є необхідним для збереження свіжості, забезпечення безпеки харчових продуктів та дотримання суворих санітарних норм. Якість і термін зберігання молока покращуються шляхом пастеризації та охолодження, що знищує шкідливі мікроорганізми. Головною метою застосування тепла є збереження молока та молочних продуктів.

Зазначено, що пастеризація – критичний процес для знищення шкідливих мікроорганізмів у продуктах харчування, значною мірою залежить від теплообмінників. Молоко, сік та інші рідкі продукти швидко нагріваються, а потім охолоджуються до певних температур, щоб знищити патогени, зберігаючи їхню харчову цінність. Теплообмінники забезпечують точний контроль температури та рівномірний нагрів, що є ключовим для ефективної пастеризації. Пластинчасті теплообмінники є у процесі пастеризації забезпечують нагрівання та охолодження. Вони ефективно передають тепло між двома рідинами з різними температурами, що є ключовим для таких операцій, як попередній нагрів та охолодження харчових продуктів. У молочній промисловості пластинчасті теплообмінники використовуються для охолодження молока після пастеризації, забезпечуючи його швидке досягнення безпечної температури для зберігання. Швидке охолодження запобігає росту мікроорганізмів, продовжуючи термін придатності продукту.

Багатоступінчасті пластинчасті теплообмінники трансформують пастеризацію молока, значно покращуючи енергоефективність, гігієну та контроль температури. Їх компактний дизайн, високі теплові характеристики та простота обслуговування роблять їх ідеальними для сучасної переробки молочних продуктів. Використовуватися для нагрівання та охолодження двох або більше рідин, зазвичай розділених проміжною рамою, і може виготовлятися на 2-ступеневий, 3-ступеневий, 4-ступеневий тощо.

Здійснено аналіз пластинчастих теплообмінників, які застосовуються для пастеризації молока.

					ННІЕТ КНУ.133.ГМБ-22.2026.ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		21

РОЗДІЛ 2

ОПТИМІЗАЦІЯ ПЛАСТИНЧАСТОГО ТЕПЛООБМІННИКА ДЛЯ ПАСТЕРИЗАЦІЇ МОЛОКА

2.1 Механізми теплообміну в пластинчастому теплообміннику

Теплопередача у найпростішому вигляді – це переміщення тепла з одного місця в інше, а процес передачі тепла між двома або більше потоками рідини при різних температурах здійснюється за допомогою спеціально розробленого обладнання, відомого як теплообмінники. Усі системи перетворення енергії передбачають теплопередачу через потоки рідини. Понад дві третини енергії втрачається в ланцюзі перетворення енергії – від її захоплення, перетворення, транспортування, виробництва, розподілу, зберігання до кінцевого використання [10]. Теплообмінник є класичним компонентом та базовим елементом не лише для всіх систем і процесів перетворення, виробництва та використання енергії, але й для харчової. Теплообмінники присутні всюди, є незамінними, у різних формах, щоб задовольняти різні потреби, і часто підпадають під суворі функціональні та експлуатаційні вимоги, є об'єктами постійних викликів та нескінченних інновацій.

Тепло може передаватися різними способами, такими як теплопровідність, конвекція та випромінювання, але в теплообмінниках найбільше значення мають перші два. Як випливає з його назви, у цьому випадку енергія у вигляді тепла передається або переміщується через провідний середовище, яке контактує з іншим середовищем з нижчою температурою. Передавання тепла має бути пропорційним площі провідного середовища, яка нормальна до тепла, а товщина провідного середовища обернено пропорційна різниці температур на його сторонах. Конвекція – це ще один із способів теплопередачі між рідиною та поверхнею з різною температурою. Наприклад, гаряча поверхня, яка контактує з холодною водою, з часом вода, що нагрівається, стає менш щільною, тоді вона піднімається, а її замінює більш холодна вода, і цей процес повторюється знову і знову [12]. Загальний коефіцієнт теплопередачі – це показник, який враховує передачу тепла шляхом теплопровідності та конвекції, беручи до уваги площу та теплові опори провідних поверхонь, що розділяють рідини, а також фактори забруднення, які виникають через нашарування або плісняву внаслідок контакту з рідинами, оскільки це знижує теплопередачу. Також враховується наявність розширеної поверхні, оскільки це збільшує площу теплопередачі.

Пластинчастий теплообмінник – це тип теплообмінника, який використовує теплообмінні пластини для передачі тепла між двома рідинами, що має суттєву перевагу над звичайним теплообмінником, оскільки рідини піддаються значно більшій площі поверхні, оскільки рідини розподілені по

					ННІЕТ КНУ.133.ГМБ-22.2026.ПЗ			
<i>Зм.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>				
<i>Розроб.</i>		<i>Третяк</i>			Удосконалення обладнання для теплової обробки молока		<i>Літ.</i>	<i>Арк.</i>
<i>Перевір.</i>		<i>Омельченко</i>						
<i>Н. Контр.</i>		<i>Омельченко</i>					22	16
<i>Затверд.</i>		<i>Цвіркун</i>					ННІЕТ КНУ Кафедра ЗІДО	

пластинах, що полегшує теплопередачу та значно збільшує швидкість зміни температури [11]. Висока ефективність теплопередачі при такому малому фізичному розмірі збільшила побутовий потік рідини. Завдяки відмінній ефективності теплопередачі, невеликим розмірам та низьким вимогам до обслуговування, пластинчаті теплообмінники часто використовуються при пастеризації рідких продуктів харчування.

Пластинчасті теплообмінники складаються з рами та напрямних стрижнів – це конструкція, на яку спираються плити та нерухома і рухома головка, її геометрія в основному залежить від геометрії плит та їх кількості. Зазвичай виготовляється з вуглецевої сталі, вміст вуглецю залежить від загальної ваги, яку вона буде витримувати. Фіксована плита закріплена на рамі за допомогою направляючих стрижнів, тоді як рухома плита кріпиться лише до направляючих стрижнів, які дозволяють її переміщати для додавання або видалення трансферних плит [12]. Плити зазвичай виготовляються з литого чавуну але їх також можуть виготовляти зі вуглецевої сталі з хромовим або нікелевим покриттям для підвищення стійкості до корозії. Кріпильні гвинти іноді використовують кріпильні шпильки, які мають накидні гайки для належного закріплення теплообмінника; функція цих елементів полягає у кріпленні та стисненні теплообмінних пластин, щоб уникнути витоків через недостатню силу при їх з'єднанні. Елементи зазвичай виготовляють з аустенітної сталі з низьким або середнім вмістом вуглецю. Прокладки мета якої полягає в підтриманні герметичності теплообмінника, тобто запобігання витоку рідин між пластинами, що спричиняє втрати потоку та падіння тиску, а головним чином спрямування рідин, щоб уникнути їх змішування. Матеріал прокладки залежить від робочої температури та застосування.

Пластины теплопередачі є основним елементом обладнання, оскільки вони відповідають за передачу енергії від гарячого потоку до холодного. Зазвичай пластины мають простий дизайн, що дозволяє збільшити теплопередачу. Вибір матеріалів, конструкції та кількості пластин залежатиме від умов обслуговування, які необхідно забезпечити. Наприклад, пластина може складатися з тонких гофрованих металевих пластин, які накладаються одна на одну та затискаються між двома торцевими пластинами, утворюючи серію вузьких каналів. У пластинчатих теплообмінниках нагрівальний або охолоджувальний носій (зазвичай гаряча вода або пар) проходить через канали з одного боку пластини, тоді як рідкий продукт, що підлягає пастеризації, потрапляє в канали з протилежного боку [1-8]. Оскільки два потоки рухаються у протилежних напрямках, тепло передається від нагрівального середовища рідкому продукту, швидко підвищуючи або знижуючи його температуру відповідно до потреби. Гофрована конструкція пластин підвищує турбулентність рідин і покращує ефективність теплопередачі, тоді як вузькі канали створюють велику площу поверхні для передачі тепла. Крім того, пластинчаті теплообмінники легко розбираються та очищуються, що робить їх ідеальними для пастеризації рідких продуктів харчування.

Пластинчасті теплообмінники є одним із найбільш ефективних обладнань для теплопередачі, які використовують металеві пластины для передачі тепла між рідинами. У порівнянні з традиційними теплообмінниками, пластинчасті

					ННІЕТ КНУ.133.ГМБ-22.2026.ПЗ	Арк.
						23
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

теплообмінники можуть значно підвищувати енергоефективність, покращувати тепло-гідравлічні характеристики та зменшувати споживання палива і викиди CO₂ [10]. Пластинчасті теплообмінники мають низку переваг, з-поміж яких є те, що мінімальна температура підходу в пластинчастих теплообмінниках може бути настільки низькою, як 2°C завдяки високому коефіцієнту теплопередачі. Крім того, у порівнянні з трубчасто-оболонковими теплообмінниками, пластинчасті теплообмінники мають більшу площу поверхні, нижчу загальну вартість, менше схильні до забруднення і забезпечують більш гнучкий тепловий дизайн порівняно з традиційними теплообмінниками.

Для досягнення покращення теплообміну необхідно враховувати два важливі фактори: ступінь теплопередачі та падіння тиску, тому необхідно збільшити теплообмін і зменшити падіння тиску. У пластинчастих теплообмінниках завдяки наявності гофрованих пластин існує значний опір потоку з високими втратами на тертя. Тому для проектування пластинчастих теплообмінників необхідно враховувати обидва фактори. Під час оптимізації пластинчастого теплообмінника необхідно враховувати низку факторів, а саме:

Геометрія пластин є одним із найважливіших факторів теплопередачі та падіння тиску в теплообмінниках пластин. Однак ця характеристика не є чітко визначеною. У гофрованих теплообмінниках через вузький шлях між пластинами існує велика ємність тиску і потік стає турбулентним [11, 13]. Тому він потребує більшої насосної потужності, ніж інші типи теплообмінників, що потребує більшої теплопередачі та меншого падіння тиску. Форма пластинчастого теплообмінника дуже важлива для промислових застосувань, які залежать від падіння тиску. Пластини є основним компонентом теплообмінника, оскільки вони є елементом, де відбувається теплообмін між рідинами через непрямий контакт. Поверхня пластин має специфічну гофру, яка характерна для кожної моделі пластини. Гофра є фактором, який ретельно вивчається та ретельно розробляється кожним виробником.

Пластини оснащені каналами, через які циркулює рідина, створюючи більшу площу теплообміну, водночас значно збільшуючи турбулентність навколишньої рідини, що сприяє високим коефіцієнтам теплопередачі тим самим покращуючи ефективність теплообміну, а також забезпечуючи більшу структурну міцність пластин в результаті внутрішнього тиску, запобігаючи шкідливій деформації. Різні пластини виготовляються з певного матеріалу. Матеріали, що використовуються для виготовлення пластин, переважно є тими, що стійкі до корозії та дозволяють штампувати геометрію пластини шляхом холодної обробки, а також мають добру теплопровідність. Тому, виходячи з цих умов, вибір здійснюється відповідно до конкретної геометрії та типу матеріалу.

Геометричний дизайн пластинчастих теплообмінників істотно впливає на їх теплопередачу. Кілька геометричних параметрів відіграють ключову роль у визначенні характеристик теплопередачі та руху рідини всередині пластинчастого теплообмінника. Профіль пластини та кут гофрування: форма та увігнутість профілю пластини значною мірою впливають на рух рідини та теплопередачу [2, 10]. Пластини з шевронним гофруванням розроблені для

посилення турбулентності та збільшення контактних точок між пластинами, що покращує теплопередачу. Кут гофрування впливає на поле потоку, поле тиску та розподіл температури в теплообміннику. Існує кілька конфігурацій пластин, таких як ребриста, «шеврон» і «зигзаг», які можна обирати при проектуванні пластинчастих теплообмінників. Однак серед 60 різних типів візерунків пластин, пластина у вигляді «шеvronу» виявилася найефективнішою і протягом багатьох років широко використовується у пластинчастих теплообмінниках. Існують різні типи геометрії гофрування пластин, а конструкція відрізняється від виробника до виробника, а отже, і термогидравлічні характеристики. Найпоширеніші конфігурації теплообмінних пластин, що використовуються в пластинчастих теплообмінниках для пастеризації молока представлені на рисунку 2.1.



Рисунок 2.1 – Геометрія пластин

Для забезпечення водонепроникного ущільнення та належної обробки всередині теплообмінника необхідно правильно вибрати прокладку, оскільки цей компонент визначає максимальну робочу температуру обладнання, гарантуючи його безпеку. Так само, як існують різні матеріали для виготовлення пластин на ринку доступний широкий вибір матеріалів для прокладок. Ці прокладки характеризуються своєю еластичністю, стійкістю до хімічного складу рідин та стійкістю до робочої температури. Залежно від типу пластини, прокладки можна приклеїти до пластини за допомогою спеціального клею, який за деяких обставин повинен відповідати дуже суворим стандартам, таким як харчовий.

Розподіл потоку рідини. Розташування пластин всередині обладнання створює певний розподіл рідини, що дозволяє використовувати різні конфігурації для гарячих і холодних рідин, що циркулюють всередині обладнання, залежно від необхідного режиму роботи. Різні схеми потоку, які перелічені нижче [12]:

– послідовний потік послідовний, змінюючи напрямок, проходячи через кожен канал, по черзі зверху вниз вертикально, що використовується, коли на вході обладнання присутні низькі швидкості потоку;

– паралельний потік розподіляється між різними доступними каналами, рівномірно циркулюючи через них та сходячись в одній точці, що використовується, коли швидкість потоку на вході висока і необхідно розділити її на секції.

Теплообмінники мають схему потоку відповідно до необхідних умов процесу, проте цей аспект не є єдиним і визначальним фактором, який слід враховувати, оскільки, окрім отримання найбільшої теплопередачі, вибір тісно пов'язаний з такими аспектами, як тип рідини, що переробляється і сировина. У пластинчастих теплообмінниках існує три типи загального розташування потоків для забезпечення теплообміну між рідинами: течія в одному напрямку (загальний потік), зустрічний потік багатопрохідне розташування потоків. Спільний потік та протитечія – це два основні варіанти. Проте протитечія більш широко використовується в промисловості, ніж спільний потік, завдяки відносно високій ефективності теплопередачі [10]. Однопрохідний режим – це такий варіант, коли як холодний, так і гарячий потоки рухаються в одному напрямку через усі канали. Багатопрохідна схема – це варіант, коли будь-який із холодного або гарячого потоків рухається в більш ніж одному напрямку. У багатопрохідних схемах рідини перебувають довше та проходять більшу відстань у пластинчастих зварних теплообмінниках, що може призводити до кращої теплообміну. Кількість проходів кожного потоку може бути різною, особливо коли необхідно мінімізувати падіння тиску з одного боку або якщо співвідношення витрати потоку досить високе, тоді розглядають різну кількість проходів. Однак серед численних багатопрохідних схем на практиці в промисловості застосовуються лише деякі з них. З урахуванням обмеження падіння тиску зазвичай кількість проходів не перевищує чотири.

2.2 Оптимізація геометрії пластини теплообмінника типу «шеврон»

Пластинчастий теплообмінник має широкий спектр застосування в харчовій промисловості або у виробництві продуктів харчування та напоїв, наприклад, у молочній промисловості його широко використовують для пастеризації молока або вершків, охолодження молока при прийомі та охолодження йогурту. Ці процеси потребують високих рівнів гігієни та санітарії, вимоги до яких задовольняють пластинчасті теплообмінники у такого роду продуктах [12]. Теплообмінники – це обладнання, призначене для передачі теплової енергії (тепла) між рідинами, де джерелом є той, що має високу температуру і передає частину або більшість своєї енергії іншому з низькою температурою. Щоб відбулась передача, повинний бути контакт між рідинами, який може бути прямим або непрямим. Прямий контакт відбувається тоді, коли рідини поєднуються без будь-якого розділення, тоді як при непрямому контакті існує стіна (зазвичай металева), яка їх розділяє, але дозволяє передачу тепла.

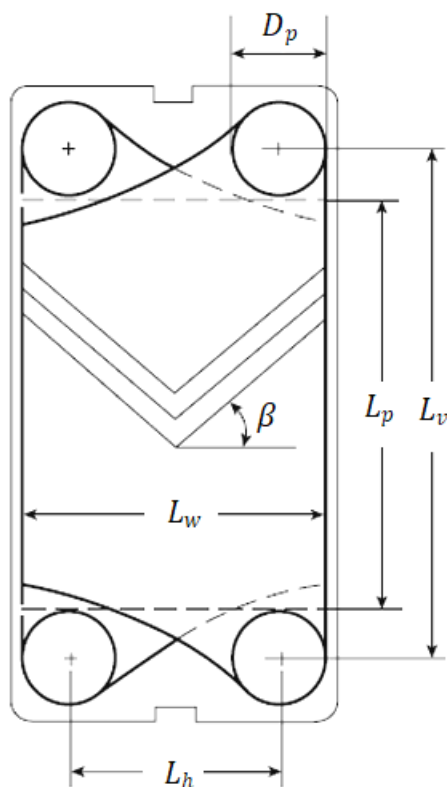
Пластинчасті теплообмінники широко використовуються у промислових системах охолодження молока завдяки їхній компактній конструкції, високій тепловій ефективності та простоті обслуговування. Проте традиційні системи пластинчастого теплообмінника стикаються з постійними проблемами,

					ННІЕТ КНУ.133.ГМБ-22.2026.ПЗ	Арк.
						26
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

включаючи неефективний теплоперенос, забруднення та підвищене енергоспоживання. Це потребує оптимізації конструкції пластинчастого теплообмінника для покращення теплової ефективності, зниження енергоспоживання та мінімізації впливу на навколишнє середовище.

Геометрія пластини теплообмінника є важливим елементом у теплообмінниках, адже на них впливають три фактори, які суттєво визначають роботу та відповідність вимогам, для яких проектується обладнання: розмір, форма та кут хвильової поверхні, а також товщина плити. Відстань між каналами варіюється від 1,6 до 5,5 мм. Ширина та висота становлять відповідно від 0,2 м до 1,5 м і від 0,5 м до 3 м [12]. Початкові характеристики пластин, деякі з цих даних надаються виробниками, а інші можуть бути встановлені як початкові параметри проектування, оскільки їх можна перерахувати залежно від результатів, отриманих у інших змінних. Розміри пластин відрізняються залежно від виробника, при цьому потрібно враховувати гофрування пластин і кут «шеврон», оскільки від цього залежить, що деякі пластини забезпечують більший теплоперенос, а інші зменшують падіння тиску.

Здійснено визначення конструктивних параметрів шевронної пластини. Характеристика геометрії пластини «шеврон» наведено в таблиці 2.1.



Таблиця 2.1 – Характеристика геометрії пластини «шеврон»

Матеріал плити	AISI 316
Товщина пластини, t	0,5 мм
Кут шеврону	45^0
Загальна кількість пластин, N_t	38
Коефіцієнт збільшення, ϕ	1,15-1,25
Загальна ефективна площа, A_e	1,8 до 3,9
Довжина стиснутих плит, L_c	0,078 м
Вертикальна відстань між портами, L_v	0,357 м
Горизонтальна відстань між портами, L_h	0,06 м
Ефективна ширина плити, L_w	0,099 м
Середина каналу, b	$2,4 * 10^{-3}$

Рисунок 2.3 – Пластина типу «шеврон»

На рисунку 2.3 позначено: D_p – діаметр отворів, β – куту гофрування пластини, L_v та L_h – вертикальна та горизонтальна відстані до центру отворів. Для конкретного випадку площі теплообміну L_w та L_p вказують ширину та висоту пластини, де закінчуються отвори, відповідно, отримані наступним чином [12]

$$L_w = L_h + D_p$$

$$L_p = L_v - D_p$$

Одним з основних факторів ефективної теплопередачі є вибір геометрії пластини. Наразі найпоширенішим гофрованим малюнком у промисловому секторі є шевронна пластина, оскільки вона виявилася найефективнішою геометрією з точки зору забезпечення максимальної турбулентності та нижчого коефіцієнта забруднення під час теплопередачі, а також сприяє більшому перепаду тиску, що підкреслює її відповідну механічну підтримку та структурну міцність. Конструкція забезпечує розподіл потоку по поверхні у формі сітки, а потім шевронну геометрію, де відбувається ефект теплообміну, у поєднанні з безклеєвим, герметичним ущільненням.

Крім того, пластина має товщину t та висоту синусоїдального гофрування p , що допомагає спрямовувати потік через прохід між гофруванням p_c та глибиною гофрування b . У цьому відношенні висота синусоїдального гофрування p та глибина гофрування b пов'язані між собою, як показано нижче. Середній крок каналу матиме наступні дані [12]

$$b = P - t \rightarrow P = b + t = (2.4 * 10^{-3} m) + (5 * 10^{-4} m) \\ P = 2.9 * 10^{-3} m$$

Визначаємо кількості теплових пластин. Теплові пластини N також відомі як ефективні пластини, являють собою набір пластин, де відбувається процес теплопередачі. Це пластини, розташовані між першою та останньою пластинами.

Ефективна кількість пластин N_e

$$N_e = N_t - 2 = 38 - 2 = 36$$

Довжина стиснутих пластин L_c [12]

$$P = \frac{L_c}{N_t} \rightarrow L_c = P * N_t = (2.9 * 10^{-3} m) \\ L_c = 0.110 m$$

Площа потоку каналу A

$$A = b * L_w$$

$$L_w = L_h + D_p = 0.06 m + 38.952 * 10^{-3} m \\ L_w \approx 0.099 m$$

$$A = 2.4 * 10^{-3} m * 0.099 m \\ A = 2.871 * 10^{-4} m^2$$

					ННІЕТ КНУ.133.ГМБ-22.2026.ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		28

Площа передачі пластини A_1

$$A_1 = \frac{A_e}{N_e} = \frac{1.8 \text{ m}^2}{36}$$
$$A_1 = 0.05 \text{ m}^2$$

Проектована площа пластини A_{1p}

$$A_{1p} = L_p * L_w = (0.318 \text{ m})(0.099 \text{ m})$$
$$A_{1p} = 0.032 \text{ m}^2$$

Розрахунок коефіцієнта збільшення поверхні. Параметр має велике значення, оскільки гофрування пластини «шеврон» збільшує площу поверхні, де відбувається теплопередача, порівняно з гладкою пластиною (без гофрування). Таким чином, коефіцієнт збільшення поверхні [12]

$$\phi = \frac{A_1}{A_{1p}} = \frac{0.05 \text{ m}^2}{0.032 \text{ m}^2}$$
$$\phi = 1.56$$

Проте це значення знаходиться поза межами, встановленими в літературі (1,15 до 1,25). Тому як коефіцієнт збільшення приймається значення 1,25 як параметр проектування. І далі проводиться перерахунок наступним чином.

Проектована площа плити A_{1p}

$$A_{1p} = L_p * L_w = (0.318 \text{ m})(0.099 \text{ m})$$
$$A_{1p} = 0.032 \text{ m}^2$$

Площа передачі пластини A_1

$$\phi = \frac{A_1}{A_{1p}} \rightarrow A_1 = \phi * A_{1p} = (1.25)(0.032 \text{ m}^2)$$
$$A_1 = 0.04 \text{ m}^2$$

Ефективна кількість пластин N_e [12]

$$A_1 = \frac{A_e}{N_e} \rightarrow N_e = \frac{A_e}{A_1} = \frac{1.8 \text{ m}^2}{0.04 \text{ m}^2}$$
$$N_e = 45$$

Ефективна площа береться як параметр проектування, оскільки на місці встановлення доступна приблизно 1 м² поверхні. Але ефективна площа – це та площа, яку мали б усі плити, які складені вертикально.

Загальна кількість плит N_t

$$N_t = N_e + 2 = 45 + 2$$
$$N_t = 47$$

Крок пластини P [12]

$$b = P - t \rightarrow P = b + t = (2.4 * 10^{-3} m) + (5 * 10^{-4} m)$$
$$P = 2.9 * 10^{-3} m$$

Довжина стиснутих плит L_c

$$P = \frac{L_c}{N_t} \rightarrow L_c = P * N_t = (2.9 * 10^{-3} m)$$
$$L_c = 0.136 m$$

Площа потоку каналу A

$$A = b * L_w = (2.4 * 10^{-3} m)(0.099 m)$$
$$A = 2.871 * 10^{-4} m^2$$

Канал або гідравлічний діаметр D_h

$$D_h = \frac{2 * b}{\phi} = \frac{2(2.4 * 10^{-3} m)}{1.25}$$
$$D_h = 3.840 * 10^{-3} m$$

Кількість каналів на крок N [12]

$$N = \frac{N_t - 1}{2 * N_p}$$

де N_p – це встановлена кількість кроків

$$N = \frac{47 - 1}{2 * 1}$$
$$N = 23$$

Оскільки пластини є основним елементом обладнання то конструктивні параметри для шевронних гофрованих пластин є абсолютно необхідними. Ці параметри відповідають за забезпечення площі для теплообміну, сприяння високій турбулентності між сусідніми каналами, які утворюються між пластинами та підтримку значного перепаду тиску в системі.

На основі отриманих розрахунків виконаємо креслення шевронної пластини для пластинчастого пастеризатора (рис. 2.4).

					ННІЕТ КНУ.133.ГМБ-22.2026.ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		30

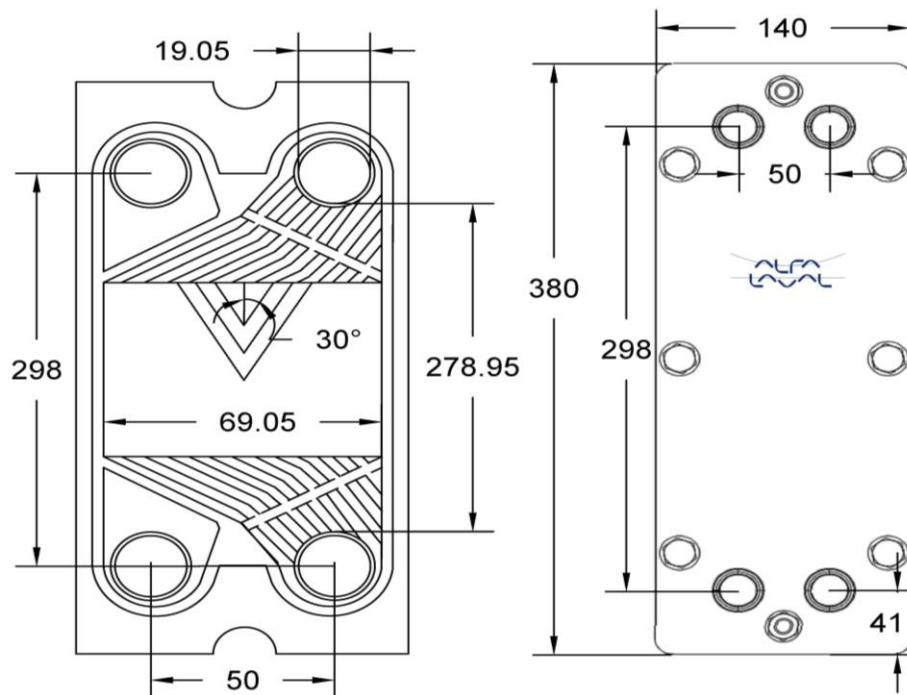


Рисунок 2.4 – Пластина для пластинчастого пастеризатора тип «шеврон»

Робоча частина пластини омивається теплоносієм, що тече всередині каналу та складається з основного гофрованого поля та зон розподілу потоку на вході та виході. Більшість тепла передається на основному гофрованому полі, площа якого становить приблизно 80–85% від загальної площі теплопередачі пластини. У зонах розподілу теплопередача значно менша але їхній вплив на загальний гідравлічний опір каналу є значним [2, 10]. Тому геометричний дизайн пластинчастих теплообмінників істотно впливає на їх теплопередачу. Кілька геометричних параметрів відіграють ключову роль у визначенні характеристик теплопередачі та руху рідини всередині пластинчастого теплообмінника. Профіль пластини та кут гофрування: форма та увігнутість профілю пластини значною мірою впливають на рух рідини та теплопередачу. Пластини з шевронним гофруванням розроблені для посилення турбулентності та збільшення контактних точок між пластинами, що покращує теплопередачу.

Шевронна пластина відрізняється від інших пластин своїм синусоїдальним гофруванням, що передбачає хвилю з кутом шеврона та глибиною гофрування, орієнтовану в напрямку потоку під час проходження між гофруваннями. Таким чином, поєднання цих параметрів з надзвичайно тонкою товщиною пластини створює суміжні канали з кількома точками контакту [12]. Це, разом зі стисненням, що виникає під час складання, дозволяє пластинам витримувати високі перепади тиску під час роботи, надаючи обладнанню його основні характеристики та необхідну турбулентність. Кут візерунку «шеврон» є параметром, який впливає як на потік так і на падіння тиску. Він також впливає на механічні властивості, оскільки кут визначає кількість контактних точок. Зазвичай кут коливається між 30° і 60° і тому

запропоновано поєднувати пластини з різними кутами для збільшення коефіцієнта теплопровідності (рис. 2.5).

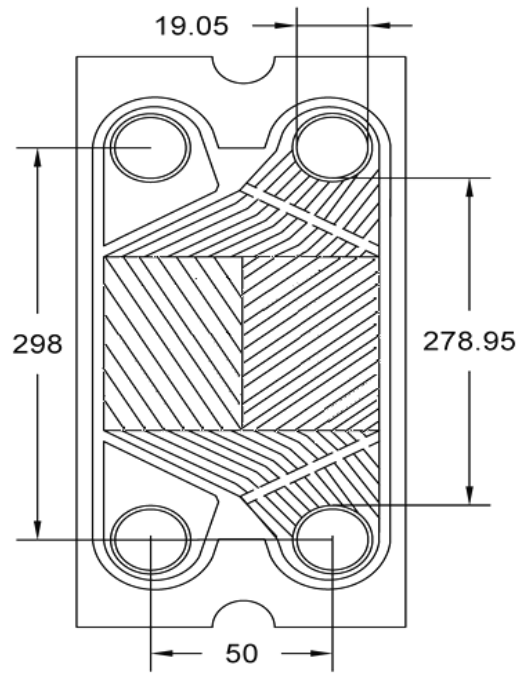


Рисунок 2.4 – Удосконалена конструкція шевронної пластини

Для досягнення покращення теплообміну необхідно враховувати два важливі фактори: ступінь теплопередачі та падіння тиску, тому необхідно збільшити теплообмін і зменшити падіння тиску. У пластинчастих теплообмінниках завдяки наявності гофрованих пластин існує значний опір потоку з високими втратами на тертя. Тому запропоновано удосконалену конструкцію шевронної пластини, яка поєднує пластини з різними кутами для збільшення коефіцієнта теплопровідності, а саме 60° і 30° відповідно.

3.3 Удосконалення системи процесу пастеризації молока

Якість і термін зберігання молока покращуються шляхом пастеризації та охолодження, що знищує шкідливі мікроорганізми. Головною метою застосування тепла є збереження молока та молочних продуктів. Конструкційні аспекти пластинчастого пастеризатора повинні забезпечувати ефективну пастеризацію молочної сировини, а також запобігати забрудненню пастеризованого молока. Для забезпечення ефективної пастеризації конструкція повинна враховувати: конструкцію нагрівальної системи, моніторинг та контроль потоку, конструкцію регулювального клапана відхилення потоку, час реагування температурних датчиків та аварійне підключення [16]. Конструкція також повинна передбачати запобігання перехресному забрудненню пастеризованого молока, наприклад, у конструкції балансного резервуара, забрудненні нагрівальної пластини під час кожного відхилення потоку, повторному зараженні через ріст мікроорганізмів із зворотного трубопроводу, перехресному забрудненню через дрібні тріщини/волокнисті тріщини в

пластинах та прокладках теплообмінника. Розглянемо обладнання, яке запропоновано використовується у процесі пастеризації молока [17]:

Змішувач – це з'єднання, метою якого є об'єднати два потоки для формування третього. Новий потік має різні властивості та змінні стану.

Насос – це обладнання, яке виконує функцію надання енергії з метою переміщення рідини. З різних типів насосів було обрано насос з ротаційними шестернями, який здійснює позитивне зміщення, де незубчаста частина зубчастих коліс, які знаходяться на вході в насос, забезпечує простір для заповнення рідиною; коли колесо обертається, рідина затримується між зубом і корпусом насоса, а потім вивільняється у напірну лінію. За допомогою таких насосів можна перекачувати будь-які рідини без абразивів, і вони підходять для високов'язких рідин. Роторні насоси здатні забезпечувати приблизно постійну пропускну здатність, проти будь-якого тиску в межах конструктивних обмежень насоса. Потік на виході змінюється прямо пропорційно швидкості і майже позбавлений пульсацій (рис. 2.5).

Пластинчастий теплообмінник: до теплообмінників відносяться всі пристрої, в яких відбувається передача тепла від гарячої рідини до холодної рідини через суцільну стінку. Обидві рідини можуть бути рідиною, газом, конденсованим паром або киплячою рідиною. У випадку процесу пастеризації вони використовуються як пристрої для нагрівання та охолодження молока.

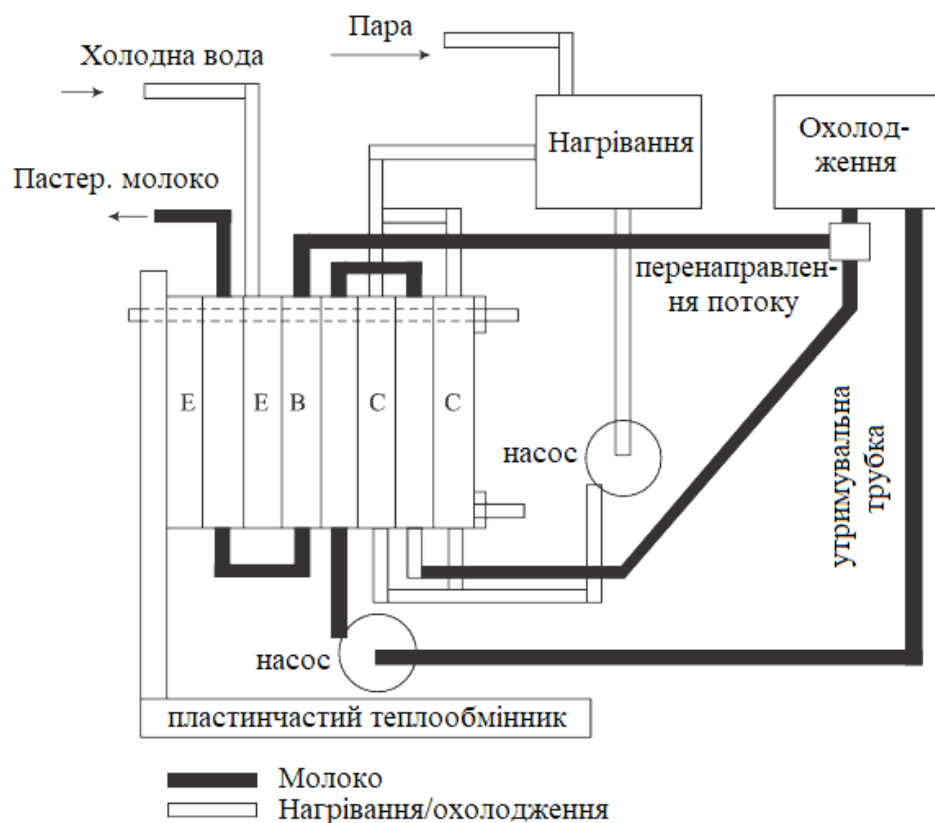


Рисунок 2.5 – Оптимізована система процесу пастеризації молока

Теплообмінник – попередній нагрівач, а саме пристрій з подвійною трубою, який використовується для попереднього нагрівання подачі. Реальний

динамічний симулятор за допомогою потоку гарячої рідини, що циркулює по кільці, яка в стаціонарному стані має температуру пастеризації. Мова йде про використання відчутного тепла гарячого потоку, що виходить з пастеризаторної труби і який повинен бути охолоджений до приблизно 4°C. Рециркуляція молока необхідна для забезпечення безперервного процесу, що досягає температури пастеризації.

Теплообмінник нагрівач також є трубкою подвійного типу, метою якої є передача потоку, що надходить із попереднього нагрівання після проходження через насос, необхідної теплової енергії для того, щоб вихідний потік досягав температури пастеризації, яка становить 75°C. Надходження тепла здійснюється за допомогою потоку пари, що циркулює через кільце, температура якого становить 135°C. Обмін теплою еквівалентний прихованому теплу, що відповідає кількості конденсованої пари.

Теплообмінник-охолоджувач у випадку пастеризатора як охолоджувальне середовище використовується аміак, який має температуру кипіння -33°C за атмосферного тиску. Призначення обладнання полягає в охолодженні потоку молока до температури 4°C.

Трубка пастеризації служить для утримання молока протягом 25 секунд при температурі 75°C, тому її вважають повністю ізольованою трубкою (адіабатичною), де є тільки падіння тиску, що залежить від її розташування.

Контролер температури має на меті перевіряти температуру (керовану змінну) на виході пастеризатора, щоб точніше контролювати процес. Дія здійснюється через ручне керування (оператор) або через автоматичне керування (за допомогою приладів). У випадку ручного керування оператор на основі періодичних вимірювань температури, наприклад, якщо вона нижча за бажане значення, збільшує рециркуляцію молока, відкриваючи клапан. Цей випадок важливий під час запуску пастеризатора.

У автоматичному контролі використовується пристрій, чутливий до температури, для генерації сигналу, пропорційного виміряній температурі. Цей сигнал подається на контролер, який порівнює його з попередньо встановленим бажаним значенням. Якщо є різниця, то контролер змінює відкриття контрольного клапана, щоб скоригувати температуру до бажаного значення.

Розподільник – це з'єднання, метою якого є розділення потоку на два, тут зберігаються склад, температура, тиск тощо. Обладнання необхідне для можливості рециркуляції частини потоку для досягнення потрібної температури на виході.

Клапан – це з'єднання, функцією якого є контроль потоку струму через нього або його повне перекриття. Дозволяє автоматично або вручну контролювати потік рідини з метою досягнення температури пастеризації.

Забруднення пластинчастого теплообмінника значно зменшує теплову ефективність теплообміну, що є ключовим фактором. Ізоляційний шар, що утворюється від відкладень на поверхні пластинчастих теплообмінників різко звужує прохід для потоку, що призводить до зростання гідравлічних та теплових порушень. Внаслідок цього до промислових процесів додаються додаткові витрати на енергію, що втрачається та на очистку. Таким чином, для

					ННІЕТ КНУ.133.ГМБ-22.2026.ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		34

підтримки ефективності виробництва відкладення, що викликають забруднення, повинні бути видалені за допомогою процедур очищення [10, 11]. Періодичне очищення (очищення на місці) є найефективнішим методом видалення всього сміття та бруду, що з часом знижує ефективність теплообмінника. Такий підхід вимагає зливу з обох сторін теплообмінника, а потім ізоляції від системної рідини. Воду слід промити з обох боків, поки вона не стане повністю прозорою. Очищення слід робити у зворотному напрямку від звичайних операцій для найкращого результату.

Пастеризоване молоко може легко піддаватися перехресному забрудненню, якщо [16]:

- молоко з балансного баку буде сифоном потрапляти в лінії пастеризованого молока, якщо рівень переповнення балансного баку вищий за рівень зворотних ліній.

- утримувальна трубка забруднюється під час кожного відведення недостатньо пастеризованого молока;

- повторне зараження через зворотний ріст мікроорганізмів;

- пластини теплообмінника містять тріщини;

- молоко всмоктується в лінію пастеризованого молока через створення вакууму в зоні охолодження та регенерації під час відведення. Під час кожного відведення недостатньо пастеризоване молоко забруднює секцію нижчого відновлення та охолоджувальні секції.

- мікропори, волосоподібні тріщини в пластинах теплообмінника або прокладках, що призводять до зараження пастеризованого молока сирим молоком/середовищами теплообміну. Це можна усунути, підтримуючи пастеризоване молоко під вищим тиском, ніж сире молоко/середовища теплообміну.

У пластинчастих теплообмінниках використовуються зони регенерації. Коли молоко потрапляє в теплообмінник воно нагрівається вже підігрітим молоком, яке, у свою чергу, одночасно охолоджується молоком, що надходить. Останнє потім додатково нагрівається гарячою водою (або паром). Далі сировина проходить через секцію-утримувач, щоб досягти достатнього часу нагрівання. Після охолодження молоко, що надходить додатково охолоджується за допомогою охолоджувального середовища. Молоко, що нагрівається та охолоджується, завжди рухається у протитечії і різниця температур між ними залишається постійною. Загалом, товщина пластини в конструкції пластинчатого пакета становить лише близько 0,6 мм. Щоб уникнути перехресного зараження від сирого молока чи теплообмінних середовищ на стороні пастеризованого молока завжди пропонується підтримувати позитивний тиск.

Будучи критичною контрольною точкою процесу, температура пастеризації молока автоматично контролюється через клапан перенаправлення потоку. Коли температура молока падає нижче встановленого значення (критичної межі), молоко перенаправляється назад у балансувальний або резервуар постійного рівня. Під час перенаправлення порушується тиск у пастеризаторі [16]. Вищий тиск сирого молока в секції регенератора може

					ННІЕТ КНУ.133.ГМБ-22.2026.ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		35

призвести до неприпустимого перехресного забруднення пастеризованого молока через тріщини пластин і несправності ущільнень. Забруднення сирого молока може проходити через систему обхідного регенераційного потоку. Під час обхідного режиму регенерації зони регенерації повинні бути підключені до всмоктувальної лінії насоса, що створить субатмосферний тиск.

Досягається шляхом підтримання наступних перепадів тиску [16]:

– за стабільних умов процесу, коли молоко рухається у напрямку потоку, тиск на стороні пастеризованого молока в зонах регенерації та обміну теплом з сирим молоком не повинен бути менше ніж на 10 кПа вище за тиск на стороні сирого молока/середовищ, що обмінюють тепло, на будь-якій спільній поверхні теплообміну.

– зниження тиску через зони регенерації зростає, тому тиск продукту перед теплообмінником повинен бути підвищений, щоб проштовхнути продукт через пластини теплообмінників. Необхідно встановити підсилювальний насос на вході в зону нагрівання. Клапан зворотного тиску (встановлений на виході з охолоджувальної зони) обмежує потік молока, задля підвищення тиску молока, що буде рівномірно розподілено в зоні пастеризованого молока.

Додаткові компоненти обладнання для пастеризації молока, щоб уникнути небажаного забруднення [16]:

1. Насос для подачі має бути встановлений між балансувальним баком і зоною сирої регенерації і працювати лише тоді, коли працює підсилювальний насос. Насос для подачі пов'язаний з клапаном відведення потоку і працює лише тоді, коли клапан знаходиться у положенні прямого потоку. Насос для подачі повинен бути підключений через автоматичний пристрій контролю тиску.

2. Відцентрований насос розташований перед зоною нагрівання в пастеризаторі. Іноді відцентрований насос використовується для подачі молока до гомогенізатора. У таких установках насос завжди повинен бути електрично зв'язаний з гомогенізатором, щоб заборонити роботу насоса, якщо гомогенізатор не працює.

3. Напірний насос використовується для відцентрового насоса, розташованого між двома послідовними зонами регенерації пастеризатора. Напірний насос працюватиме у випадку відхилення потоку. Напірний насос безпосередньо забирає сире молоко з балансного резервуару і подає його до освітлювача, мінаючи зону регенерації.

На основі вище зазначеного можна вважати, що пластинчастий теплообмінник має широкий спектр застосування в харчовій промисловості або у виробництві продуктів харчування та напоїв, наприклад, у молочній промисловості його широко використовують для пастеризації молока або вершків, охолодження молока при прийомі та охолодження йогурту. Пластинчастий теплообмінник – це тип теплообмінника, який використовує теплообмінні пластини для передачі тепла між двома рідинами, що має суттєву перевагу над звичайним теплообмінником, оскільки рідини піддаються значно більшій площі поверхні, оскільки рідини розподілені по пластинах, що

полегшує теплопередачу та значно збільшує швидкість зміни температури.

Зазначено, що для досягнення покращення теплообміну необхідно враховувати два важливі фактори: ступінь теплопередачі та падіння тиску, тому необхідно збільшити теплообмін і зменшити падіння тиску. У пластинчастих теплообмінниках завдяки наявності гофрованих пластин існує значний опір потоку з високими втратами на тертя. Тому для проєктування пластинчастих теплообмінників необхідно враховувати обидва фактори.

Вважається, що одним з основних факторів ефективної теплопередачі є вибір геометрії пластини. Наразі найпоширенішим гофрованим малюнком у промисловому секторі є шевронна пластина, оскільки вона виявилася найефективнішою геометрією з точки зору забезпечення максимальної турбулентності та нижчого коефіцієнта забруднення під час теплопередачі, а також сприяє більшому перепаду тиску, що підкреслює її відповідну механічну підтримку та структурну міцність. Конструкція забезпечує розподіл потоку по поверхні у формі сітки, а потім шевронну геометрію, де відбувається ефект теплообміну, у поєднанні з безклеєвим, герметичним ущільненням.

Запропоновано для досягнення покращення теплообміну в пластинчастому теплообміннику для пастеризації молока удосконалену конструкцію шевронної пластини, яка поєднує пластини з різними кутами для збільшення коефіцієнта теплопровідності, а саме 60° і 30° відповідно.

Сконцентровано увагу на тому, що конструкційні аспекти пластинчастого пастеризатора повинні забезпечувати ефективну пастеризацію молочної сировини, а також запобігати забрудненню пастеризованого молока. Для забезпечення ефективної пастеризації конструкція повинна враховувати: конструкцію нагрівальної системи, моніторинг та контроль потоку, конструкцію регулювального клапана відхилення потоку його розташування, час реагування температурних датчиків та аварійне підключення.

Конструкція також повинна передбачати запобігання забрудненню пастеризованого молока, наприклад, у конструкції балансного резервуара, забрудненні нагрівальної пластини під час кожного відхилення потоку, повторному зараженні через ріст мікроорганізмів із зворотного трубопроводу, перехресному забрудненню через дрібні тріщини/волокнисті тріщини в пластинах та прокладках теплообмінника. Для уникнення небажаного забруднення необхідно підтримувати пастеризоване молоко під вищим тиском, ніж сире молоко/теплоносії у процесі пастеризації. Задля цього запропоновано додаткове обладнання у системі пастеризації молока, а саме:

- насос для подачі, який встановлений між балансувальним баком і зоною сирої регенерації і працювати лише тоді, коли працює підсилювальний насос;
- відцентрований насос розташований перед зоною нагрівання в пастеризаторі;
- напірний насос використовується для відцентрового насоса, розташованого між двома послідовними зонами регенерації пастеризатора. Напірний насос працюватиме у випадку відхилення потоку. Напірний насос безпосередньо забирає сире молоко з балансного резервуару і подає його до освітлювача, минаючи зону регенерації.

РОЗДІЛ 3

АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕНЬ

3.1 Вплив пастеризації на харчову цінність та сенсорні властивості рідких продуктів

На ефективність процесу пастеризації можуть впливати низка факторів. Ці змінні включають тип присутніх мікроорганізмів, початкове мікробне навантаження, температуру та тривалість впливу, рН та склад харчового продукту, а також температуру та тривалість впливу.

Тип мікроорганізмів, присутніх у харчовому продукті: ефективність пастеризації залежить від типу мікробів, присутніх у продукті. Деякі мікроорганізми є більш стійкі до тепла, ніж інші, і різні мікроорганізми мають різний ступінь термостійкості. Наприклад, бактерії, що утворюють спори більш термостійкі, ніж бактерії, що не утворюють спори. Віруси, дріжджі та цвіль також можуть відрізнятися за своєю термостійкістю [7]. Початкове мікробне навантаження: початкове мікробне навантаження на продукт є ще одним важливим фактором, що впливає на пастеризацію. Чим більше початкове мікробне навантаження, тим довше продукт потрібно нагрівати для досягнення бажаного рівня зменшення мікроорганізмів. Це пояснюється тим, що тепло повинно проникнути в продукт, щоб дістатися всіх наявних мікроорганізмів, а велика кількість мікроорганізмів може діяти як бар'єр для тепла.

Температура і час впливу: температура і час впливу є критичними факторами, що визначають ефективність пастеризації. Температура повинна бути достатньо високою, щоб вбити мікроорганізми, але не настільки, щоб вплинути на якість продукту. Час впливу залежить від використовуваної температури та початкового мікробного навантаження продукту. Загалом період впливу повинен бути коротшим при високих температурах і довшим при нижчих температурах [7]. рН і склад продукту: рН і склад продукту також можуть впливати на пастеризацію. Продукти з низьким рН, такі як фруктові соки, більш стійкі до нагрівання, ніж ті, що мають вищий рН, наприклад молоко. Подібним чином, продукти з високим вмістом жиру, такі як вершки, потребують тривалішого нагрівання для досягнення того ж рівня зменшення мікроорганізмів, що й продукти з меншим вмістом жиру.

Однорідність продукту: однорідність продукту також є важливим фактором при пастеризації. Якщо продукт неоднорідний, можуть бути ділянки, де температура недостатньо висока, щоб убити всі наявні мікроорганізми. Це може траплятися у продуктах, що мають густу консистенцію або містять тверді частинки, наприклад фруктову м'якоть або томатний соус. Тип наявних мікроорганізмів, початкове мікробне навантаження, температура і тривалість впливу, рН і склад продукту, а також його однорідність – це деякі з змінних, що

					ННІЕТ КНУ.133.ГМБ-22.2026.ПЗ			
<i>Зм.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>				
<i>Розроб.</i>		<i>Третяк</i>			Удосконалення обладнання для теплової обробки молока		<i>Літ.</i>	<i>Арк.</i>
<i>Перевір.</i>		<i>Омельченко</i>						<i>Аркушів</i>
<i>Н. Контр.</i>		<i>Омельченко</i>					38	6
<i>Затверд.</i>		<i>Цвіркун</i>			ННІЕТ КНУ Кафедра ЗІДО			

можуть впливати на ефективність пастеризації. Ураховуючи ці фактори, виробники можуть забезпечити ефективність процесу пастеризації у зменшенні мікробного навантаження продуктів до рівня, безпечного для споживання людьми.

Матеріали для упаковки, призначені для пастеризації рідких продуктів харчування, повинні витримувати високі температури та тиск, що використовуються під час процесу, без шкоди для цілісності упаковки або якості продукту. Ось деякі поширені матеріали для упаковки, які використовуються для пастеризації рідких продуктів харчування [7]:

Скло: для пастеризованих рідких продуктів, таких як молоко, сік і пиво, скло є поширеним матеріалом для упаковки. Воно витримує високі температури та тиск процесу пастеризації, а також не вступає в реакцію з продуктом, тобто не впливає на його смак чи якість.

Метал: металева упаковка, така як банки та жерстяні коробки, часто використовується для пастеризованих рідких продуктів, наприклад консервованих фруктових соків, супів та овочів. Метал, що використовується для цих упаковок, зазвичай покритий шаром епоксидної смоли або іншого захисного шару, щоб запобігти будь-якій хімічній взаємодії між металом і продуктом.

Пластик: пластикова упаковка також використовується для пастеризованих рідких продуктів, особливо для напоїв, таких як вода, сік та газовані напої. Пластикові контейнери можуть витримувати високі температури та тиск під час процесу пастеризації, а також легкі та зручні для транспортування. Матеріал, що використовується для упаковки, повинен витримувати пастеризацію, не порушуючи якості або безпеки продукту.

У порівнянні з термічною стерилізацією, пастеризація є дуже м'якою тепловою обробкою, яка меншою мірою впливає на харчові, функціональні та сенсорні властивості більшості продуктів. Продукти, які були пастеризовані, зазвичай лише на кілька днів або тижнів отримують подовжений термін зберігання. Пастеризація в основному мало впливає на пігменти, що містяться в рослинних та тваринних продуктах [7]. Фруктові соки втрачають леткі ароматичні молекули під час термічної пастеризації, що знижує якість і може також виявляти інші «варені» смаки. Одним із негативних наслідків термічної пастеризації є деградація фенолів. Вивільнення фенольних сполук із зв'язаних форм, розпад поліфенолів та руйнування й трансформація фенолів – це лише кілька складних фізичних і хімічних реакцій, які може спричинити термічна обробка та які впливають на фенольний склад.

Вітаміни, які природно присутні в молоці, майже не зазнають впливу пастеризації. І на відміну від сирого молока, яке містить мало вітаміну D, пастеризоване молоко збагачено цим вітаміном, який допомагає організму засвоювати кальцій і є важливим для здоров'я кісток. Лише рівень рибофлавіну, або вітаміну B2, значно знижується після пастеризації. Пастеризоване молоко залишається значним джерелом цього вітаміну в раціоні. Зовнішній вигляд молочних продуктів залежить від кількох факторів, пов'язаних із первинною та перетворювальною обробкою, а також умовами зберігання. Споживачі чутливо

реагують на колір продукту як компонент його вигляду. Тому вимірювання кольору є важливим інструментом для управління якістю процесів і продукції у молочній промисловості. Характеристики сирого молока пов'язані з низкою харчових змінних. Різна кількість каротиноїдів, що містяться в молоці, допомагає надавати молочним продуктам унікальні поживні та сенсорні якості. Каротиноїди відіграють важливу роль у впливі на колір молочних продуктів [7]. Науковці досліджували вплив високотемпературної короткочасної пастеризації на якість молока, призначеного для споживання. Було встановлено, що термічна обробка знизилася середню оцінку сенсорного кольору для обох видів молока. Це зниження було більш значущим для сирого молока, ніж для відновленого, що пов'язано зі збільшенням кількості зразків з «кремово-білим» кольором, який з'явився після термічної обробки. Проте молоко хорошої якості має матово-білий колір, що в значній мірі обумовлено жиром і пігментами каротину.

3.2 Моделювання пластини теплообмінника типу «шеврон»

Теплообмінники відіграють важливу роль у харчовій промисловості. У більшості випадків пластинчастий тип є найбільш ефективним теплообмінником, оскільки він пропонує найкраще рішення теплових проблем, маючи найбільші межі тиску та температури в межах наявного обладнання. Пластинчасті теплообмінники мають багато переваг, оскільки вони більш теплоємні, займають менше місця, легші та не потребують такої частоти очищення, як інші теплообмінники. Зігнуті пластини, з'єднані між собою, утворюють порожнину, яка посилює турбулентний потік рідини з метою максимізації теплопередачі в теплообміннику. Високий ступінь турбулентності можна отримати при низьких витратах потоку, а потім досягти великого коефіцієнта теплопередачі [18]. Для збільшення теплопередачі в пластинчастих теплообмінниках пасивним методом на пластинах розташовуються прямокутні ребра, щоб подовжити шлях руху рідини та збільшити площу поверхні пластин. Оптимальна ефективність досягається для менш тупих (тобто більш гострих) гофрувань, коли канали пластин наближаються один до одного, тоді як ефективність пластинчастого теплообмінника може бути покращена для нижчих значень каналу співвідношення сторін (тобто ширші канали) і для вищих значень кута хвилястості. За обмежень фіксованої геометрії поверхні пластини та постійної потужності насоса, теплопередача може бути покращена до 2,8 разів порівняно з плоским каналом. Коефіцієнт теплопередачі та перепад тиску збільшуються пропорційно до масового потоку та обернено пропорційно до кута шеврона.

Для досягнення цілей підвищення ефективності теплообмінників необхідно застосовувати сучасні підходи до їхнього проектування. Також необхідні розрахунки різних режимів для широкого кола завдань, які включають: визначення теплової потужності та витрати охолоджуючої рідини за відсутності витратомірів, прогнозування необхідних фізичних параметрів та швидкостей потоку охолоджуючої рідини, формулювання обґрунтування

					ННІЕТ КНУ.133.ГМБ-22.2026.ПЗ	Арк.
						40
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

вибору обладнання трубопровідних систем, діагностику нагрівальних поверхонь тощо [2, 18]. Геометрія та формування пластин є критично важливими для загальної теплової та механічної ефективності системи. Використовуючи SolidWorks процес проектування розпочався зі створення індивідуальної штамп-форми, яка згодом була збережена в бібліотеці конструкцій SolidWorks у категорії Forming Tool. Потім була змодельована фланець з відповідними розмірами і до нього було застосовано штамп-форми для отримання потрібної геометрії пластини (рис. 3.1).

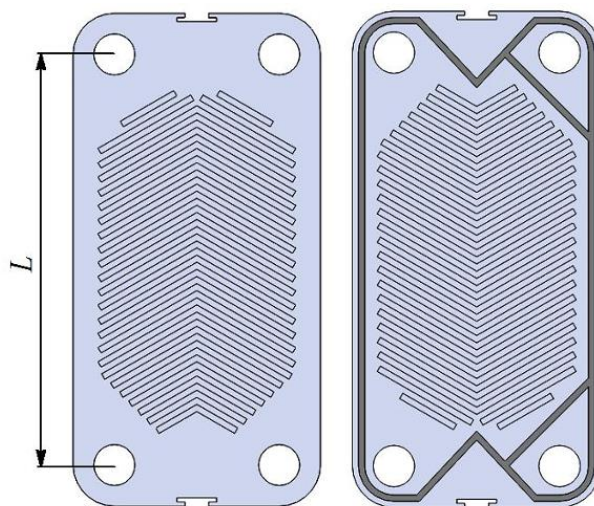


Рисунок 3.1 – Геометрія дизайну пластини теплообмінника

На рисунку 3.1 зображено обидві сторони пластини теплообмінника. Геометрія на кожній стороні відіграє ключову роль у напрямку потоків рідини та підвищенні турбулентності на поверхні, що, в свою чергу, покращує ефективність теплообміну [2]. Симетричний дизайн також забезпечує чергування каналів для рідини при укладанні пластин, гарантуючи ефективну роботу контрпотокотом у зібраному теплообміннику. Обидва порти – вхідний та вихідний – використовуються для тієї ж конфігурації пластини шляхом зміни розташування прокладки, що дозволяє забезпечити гнучкість у напрямку потоку. Перед запуском моделювання в системі були визначені наступні вхідні параметри:

- вхідний масовий потік 1: 1 кг/с;
- вхідна температура 1: 60°C;
- вхідний масовий потік 2: 1 кг/с;
- вхідна температура 2: 10°C;
- атмосферний тиск: 101,325 Па;
- температура навколишнього середовища: 20°C.

Здійснювалося змодельовати охолодження молока у SolidWorks для стандартної пластини теплообмінника типа «шеврон» та для удосконаленої геометрії пластини, а саме запропонованої для досягнення покращення теплообміну в пластинчастому теплообміннику для пастеризації молока, яка поєднує пластини з різними кутами для збільшення коефіцієнта теплопровідності, а саме 60° і 30° відповідно. Модель складається з чотирьох чергуючихся пластин, причому кожна пластина герметизується прокладкою для

забезпечення ізоляції та правильного спрямування потоку. Траєкторії потоку наочно відображають чергування руху у протитечії при якому гарячі та холодні рідини проходять через суміжні канали. Конфігурація підвищує теплову ефективність теплообмінника, максимізуючи градієнт температури між пластинами.

Параметри були необхідні для ініціалізації теплових та потокових граничних умов у середовищі моделювання, задля симуляції внутрішньої динаміки потоку в пластинчастому теплообміннику. У моделі червоний потік представляє гарячу рідину, тоді як синій потік позначає холодну рідину. Хоча первісною метою було змодельовати охолодження молока у SolidWorks відсутній попередньо визначений матеріал для молока. Тому для обох потоків – гарячого та холодного – використовувалася вода як прийнятний тепловий заміник. Обидві рідини були подані в теплообмінник з однаковими масовими витратами 1 кг/с. Гаряча вода входить при температурі 60°C, тоді як холодна вода входить при 10°C. Моделювання проводилось за стандартного атмосферного тиску 101,325 Па та кімнатної температури 20°C.

Гаряча вода надходить у пластинчастий теплообмінник при температурі 60°C і виходить при середній температурі приблизно 20°C. Однак вимірювання температури на виході також показують мінімальне значення 20°C. Коливання температури на виході може бути зумовлене спрощеною тестовою конфігурацією, яка включала лише чотири пластини [2]. Зменшена кількість поверхонь теплового контакту може обмежувати ефективність теплопередачі, дозволяючи частині гарячої рідини зберігати вищу температуру при виході. Якщо мінімальну температуру на виході 20°C розглядати як ефективну температуру, загальне падіння температури через теплообмінник становить 40°C (тобто 60°C – 20°C), що свідчить про значний тепловий обмін навіть у обмеженій конфігурації.

У моделюванні, яке використовувало лише чотири пластини, різницю температур спостерігали таким чином:

Падіння температури: падіння = початкове значення – кінцеве значення = 60°C – 20°C = 40°C/

Відсоток падіння температури: $(40/60) \times 100 = 66,67\%$.

Характеристики плит: кожна плита має розміри 735 мм × 320 мм/

Площа однієї плити = $0,735 \times 0,320 = 0,2352 \text{ м}^2$ (загальна площа).

Після врахування зазорів потоку ефективна площа теплообміну на пластину оцінюється приблизно в 60–70% від загальної площі. Тому ефективна площа на пластину становить приблизно: ефективна площа на пластину $\approx 0,15 \text{ м}^2$. Загальна площа теплообміну (4 пластини): загальна площа = $4 \times 0,15 = 0,6 \text{ м}^2$.

Конфігурація з 4 пластин, що забезпечує загальну площу тепловіддачі 0,6 м², призводить до зниження температури з 60°C до 20°C. Однак для досягнення більш значного зниження температури необхідні додаткові пластини. Необхідні пластини для подальшого охолодження: щоб досягти зниження температури з 20°C до 4°C, оцінюється, що може знадобитися від 14 до 18 пластин. Використання крижаної води при 0–4°C потенційно може охолодити молоко до бажаних 4°C. Обчислення підкреслює необхідність збільшення кількості

пластин для ефективного зниження температури рідини нижче початкового падіння на 40°C.

Щоб досягти кінцевої температури молока 4°C, температура холодної води на вході повинна бути на рівні або нижче цього значення. У поточному моделюванні була використана температура холодної води на вході 10°C. Основною метою цього моделювання було спостерігати за зниженням температури всередині пластинчастого теплообмінника (рис. 3.2). Проте в реальних умовах застосовують крижану воду, зазвичай при 0–4°C, щоб досягти більш значного перепаду температур і забезпечити необхідну ефективність охолодження.

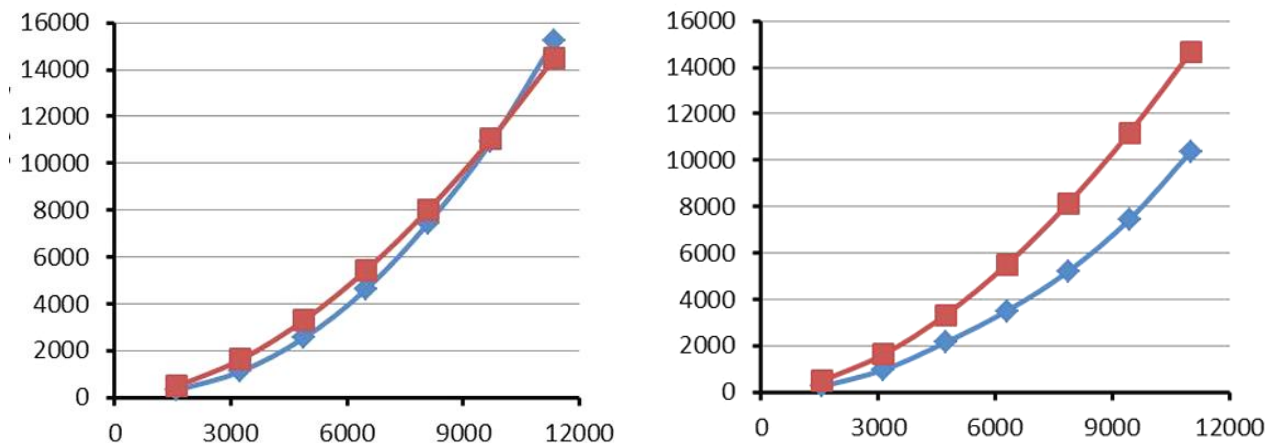


Рисунок 3.2 – Моделювання традиційної на удосконаленій системи нагрівання/охолодження молока

Результати свідчать, що удосконалена система на основі поєднання пластин теплообмінника з різними кутами для збільшення коефіцієнта теплопровідності, а саме 60° і 30° ефективно знижує температуру молока з 60°C до 4°C за допомогою крижаної води, забезпечуючи зниження температури на 93,33%. У моделюванні витрату маси на вході було встановлено на рівні 1 кг/с, що є типовим значенням для такого типу системи. Проте, враховуючи діаметр отвору в пластині 60 мм, швидкість потоку рідини через цей отвір становить приблизно 0,34 м/с. Швидкість менше 1 м/с прийнятна для плавного ламінарного потоку, що допомагає запобігти надмірному падінню тиску в системі [2]. Якщо швидкість потоку занадто низька, це може призвести до низької ефективності теплообміну, оскільки рідина може недостатньо взаємодіяти з поверхнею теплообмінника. Вищі швидкості (понад 2–3 м/с) можуть спричинити турбулентність, яка, хоча й сприяє деякому змішуванню, також може призвести до більших втрат тиску та збільшеного тертя.

На основі вище зазначеного можна вважати, що удосконалена система на основі поєднання пластин теплообмінника з різними кутами для збільшення коефіцієнта теплопровідності, а саме 60° і 30° ефективно знижує температуру молока з 60°C до 4°C за допомогою крижаної води, забезпечуючи зниження температури на 93%.

ВИСНОВКИ

Бакалаврська робота присвячена удосконаленню обладнання для теплової обробки молока. У роботі зазначено, що продукти молочної промисловості високої якості є джерелом необхідних поживних речовин у вигляді здорової та поживної сировини, яка поступово стає все більш затребуваною у світі. Молоко є найпотрібнішим і невід'ємним компонентом усіх молочних продуктів, що містить різні поживні речовини, необхідні для щоденного харчування людини. Якість і термін зберігання молока покращуються шляхом пастеризації та охолодження, що знищує шкідливі мікроорганізми. Головною метою застосування тепла є збереження молока та молочних продуктів.

У першому розділі здійснено аналіз обладнання для теплової обробки молока. Зазначено, що пастеризація – критичний процес для знищення шкідливих мікроорганізмів у продуктах харчування, який значною мірою залежить від теплообмінників. Молочну сировину швидко нагріваються, а потім охолоджуються до певних температур, щоб знищити патогени, зберігаючи їхню харчову цінність. Теплообмінники забезпечують точний контроль температури та рівномірний нагрів, що є ключовим для ефективної пастеризації.

Аналіз наукових джерел дав змогу виявити, що у процесі теплової обробки молока застосовуються пластинчасті теплообмінники, які використовують теплообмінні пластини для передачі тепла між двома рідинами, що має суттєву перевагу над звичайним теплообмінником. Рідини піддаються значно більшій площі поверхні, оскільки розподілені по пластинах, що полегшує теплопередачу та значно збільшує швидкість зміни температури. Висока ефективність теплопередачі при такому малому фізичному розмірі збільшує потік рідини. Завдяки відмінній ефективності теплопередачі, невеликим розмірам та низьким вимогам до обслуговування, пластинчасті теплообмінники використовуються при пастеризації рідких продуктів харчування. Здійснено аналіз пластинчастих теплообмінників, які застосовуються для пастеризації молока, а саме пластинчасті теплообмінники з прокладками, паяні теплообмінники, зварні пластинчасті теплообмінники, спіральні теплообмінники та теплообмінники з паяними пластинами.

Другий розділ присвячено оптимізації пластинчастого теплообмінника для пастеризації молока. Вважається, що для досягнення покращення теплообміну необхідно враховувати два важливі фактори: ступінь теплопередачі та падіння тиску, тому необхідно збільшити теплообмін і зменшити падіння тиску в теплообміннику. У пластинчастих теплообмінниках завдяки наявності гофрованих пластин існує значний опір потоку з високими втратами на тертя. Тому для проектування пластинчастих теплообмінників необхідно враховувати обидва фактори.

					ННІЕТ КНУ.133.ГМБ-22.2026.ПЗ								
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	Удосконалення обладнання для теплової обробки молока				Лім.	Арк.	Аркуші		
Розроб.	Третяк												
Перевір.	Омельченко										47	2	
									ННІЕТ КНУ Кафедра ЗІДО				
Н. Контр.	Омельченко												
Затверд.	Цвіркун												

Зазначено, що одним з основних факторів ефективної теплопередачі є вибір геометрії пластини. Наразі найпоширенішим гофрованим малюнком у промисловому секторі є шевронна пластина, оскільки вона виявилася найефективнішою геометрією з точки зору забезпечення максимальної турбулентності та нижчого коефіцієнта забруднення під час теплопередачі, а також сприяє більшому перепаду тиску, що підкреслює її відповідну механічну підтримку та структурну міцність. Конструкція забезпечує розподіл потоку по поверхні у формі сітки, а потім шевронну геометрію, де відбувається ефект теплообміну у поєднанні з безклеєвим, герметичним ущільненням.

Запропоновано для досягнення покращення теплообміну в пластинчастому теплообміннику для пастеризації молока удосконалену конструкцію шевронної пластини, яка поєднує пластини з різними кутами для збільшення коефіцієнта теплопровідності, а саме 60° і 30° відповідно.

Сконцентровано увагу на тому, що конструкційні аспекти пластинчастого пастеризатора повинні забезпечувати ефективну пастеризацію молочної сировини, а також запобігати забрудненню пастеризованого молока, наприклад, через забруднення нагрівальної пластини під час кожного відхилення потоку, забруднення яке виникає через дрібні тріщини в пластинах та прокладках теплообмінника. Для уникнення небажаного забруднення необхідно підтримувати пастеризоване молоко під вищим тиском, ніж сире молоко/теплоносії у процесі пастеризації. Задля цього запропоновано додаткове обладнання у системі пастеризації молока, а саме:

- насос для подачі, який встановлений між балансувальним баком і зоною сирої регенерації і працювати лише тоді, коли працює підсилювальний насос;
- відцентрований насос розташований перед зоною нагрівання в пастеризаторі;
- напірний насос використовується для відцентрового насоса, розташованого між двома послідовними зонами регенерації пастеризатора. Напірний насос працюватиме у випадку відхилення потоку. Напірний насос безпосередньо забирає сире молоко з балансного резервуару і подає його до освітлювача, минаючи зону регенерації.

Третій розділ присвячено моделюванню процесу охолодження молока у SolidWorks для стандартної пластини теплообмінника типа «шеврон» та для удосконаленої геометрії пластини, а саме запропонованої для досягнення покращення теплообміну в пластинчастому теплообміннику для пастеризації молока, яка поєднує пластини з різними кутами для збільшення коефіцієнта теплопровідності, а саме 60° і 30° відповідно. Геометрія та формування пластин є критично важливими для загальної теплової та механічної ефективності системи.

Результати свідчать, що удосконалена система на основі поєднання пластин теплообмінника з різними кутами для збільшення коефіцієнта теплопровідності, а саме 60° і 30° ефективно знижує температуру молока з 60°C до 4°C за допомогою крижаної води, забезпечуючи зниження температури на 93%. Проте, враховуючи діаметр отвору в пластині 60 мм, швидкість потоку рідини через цей отвір становить приблизно 0,34 м/с.

					ННІЕТ КНУ.133.ГМБ-22.2026.ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		45

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Plate heat exchanger design methodology. URL: <https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/141300/Uwe%20THESIS.pdf;sequence=1>.
2. Advanced design and thermal analysis of a plate heat exchanger for milk cooling in industrial food processing applications. URL: <https://www.theseus.fi/handle/10024/883882>.
3. Modeling and design of plate heat exchanger. URL: <https://cdn.intechopen.com/pdfs/48647.pdf>.
4. Різновиди теплообмінників: пластинчасті, трубчасті та інші. Режим доступу: <https://ankort.com/ua/riznovydy-teploobminnykiv/>.
5. Теплообмінники, які використовуються у харчовій промисловості. Режим доступу: <https://www.6262.com.ua/list/504072>.
6. Classification of heat exchangers. URL: <https://profile.iitd.ac.in/~pmvs/courses/mel709/classification-hx.pdf>.
7. Unit operations in food processing. URL: https://www.researchgate.net/publication/377414709_Chapter_9_Pasteurization.
8. Пастеризація. види пастеризаторів. Режим доступу: <https://ankort.com/ua/pasterizatsiya-vidy-pasterizatorov/>.
9. Multi-stage plate heat exchangers. URL: <https://heat-exchanger-world.com/boosting-dairy-processing-with-multi-stage-plate-heat-exchangers/>.
10. Мирончук В.Г. Обладнання підприємств переробної і харчової промисловості: підручник. Вінниця: Нова книга, 2007. 648 с.
11. Intercambiador de calor de placas. URL: <https://academia-lab.com/enciclopedia/intercambiador-de-calor-de-placas/>
12. Diseño termohidráulico de un intercambiador de calor de placas en el equipo de combustión diésel-aire de la carrera de ingeniería química de la fes zaragoza. URL: <https://ru.dgb.unam.mx/server/api/core/bitstreams/8b76f1ad-a765-4063-973d-b9a18fcd0f90/content>.
13. Обладнання підприємств переробної та харчової промисловості / В.Г.Мирончук та ін. ; М-во освіти і науки України за ред. В. Г. Мирончука. Вінниця Нова книга, 2007. 648 с.
14. Обладнання підприємств переробної та харчової промисловості / Мирончук В.Г., Гулий І.С., Пушанко М.М. та ін.; за ред. В.Г. Мирончука. Вінниця: Нова книга, 2010. 720 с.
15. Огляд теплообмінного обладнання. Режим доступу: <https://teplo-polis.com.ua/ua/blog-teplo-polis/ogljad-teploobminnogo-obladnannja/>.
16. Hygienic design aspects of pasteurizer to prevent cross contamination of pasteurized milk. URL: <https://www.academia.edu/11153667>.
17. Nociones teóricas del proceso de pasteurización de la leche. URL: <https://www.modeloingenieria.edu.ar/images/descargas/cap03.pdf>.
18. Cfd simulation of the heat transfer process in a chevron plate heat exchanger using the SST turbulence model. URL: <https://www.researchgate.net/publication/282842122>.

					ННІЕТ КНУ.133.ГМБ-22.2026.ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		46