

**НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ
І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ**
ННІ ЕНЕРГЕТИКИ, АВТОМАТИКИ І ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ

ПОГОДЖЕНО
Директор ННІ енергетики,
автоматики і енергозбереження
(назва ННІ)

ДОПУСКАЄТЬСЯ ДО ЗАХИСТУ
В.о. завідувача кафедри автоматики
та робототехнічних систем
ім. акад. І.І. Мартиненка
(назва кафедри)

проф., д.т.н. _____ **В.В. Каплун**
(підпис) (ПІБ)

доц., к.т.н. _____ **О.О. Опришко**
(підпис) (ПІБ)

« ____ » _____ 2025 р.

« ____ » _____ 2025 р.

МАГІСТЕРСЬКА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на тему: **«ДОСЛІДЖЕННЯ ТА РОЗРОБКА СИСТЕМИ
АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ ТЕМПЕРАТУРНИМ РЕЖИМОМ
ПАСТЕРИЗАТОРА МОЛОКА»**

Спеціальність:
174 – «Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка»
(шифр і назва)

Освітня програма:
Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка
(назва)

Орієнтація освітньої програми: освітньо-професійна
(назва)

Гарант освітньої програми

_____ **К.Т.Н., ДОЦЕНТ**
(науковий ступінь та вчене звання)

_____ (підпис)

Лендєл Т.І.
(П.І.Б)

Керівник магістерської кваліфікаційної роботи

_____ **К.Т.Н., ДОЦЕНТ**
(науковий ступінь та вчене звання)

_____ (підпис)

Лендєл Т.І.
(П.І.Б)

Виконав

_____ (підпис)

Марченко А.С.
(П.І.Б студента)

**НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ
І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ
ІННІ ЕНЕРГЕТИКИ, АВТОМАТИКИ І ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ**

ЗАТВЕРДЖУЮ

В.о. завідувача кафедри
автоматики та робототехнічних
систем ім. акад. І.І. Мартиненка

К.Т.Н., доц. _____ **О.О. Опришко**
« ____ » _____ 2024 р.

З А В Д А Н Н Я
ДО ВИКОНАННЯ МАГІСТЕРСЬКОЇ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ ЗДОБУВАЧУ
Марченку Андрію Сергійовичу

Спеціальність:

174– «Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка»

Освітньо-професійна програма:

Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка

Орієнтація освітньої програми: освітньо-професійна

Тема магістерської кваліфікаційної роботи **«Дослідження та розробка системи автоматичного керування температурним режимом пастеризатора молока»**,

затверджена наказом від 18.11.2024 року №2059«С»

Термін подання студентом магістерської роботи 14.11.2025 року

Вихідні дані магістерської кваліфікаційної роботи: завдання кафедри на виконання магістерської кваліфікаційної роботи; нормативні документи по проектуванню об'єктів автоматизації; матеріали дослідження, аналізу та моделювання; наукова література з тематики магістерської роботи.

Перелік питань, що підлягають дослідженню:

1. Сучасні технології процесу пастеризації молока.
2. Дослідження та моделювання інфрачервоного проточного пастеризатора молока із рекуператором.
3. Вибір регулятора та обґрунтування параметрів його налаштувань.
4. Розробка цифрової системи керування.
5. Схеми системи автоматизації та засоби візуалізації процесу керування.

Дата видачі завдання «19» листопада 2024 року

Керівник магістерської кваліфікаційної роботи

(Підпис)

Лендел Т.І.
(Прізвище та ініціали)

Завдання прийняв до виконання

(Підпис)

Марченко А.С.
(Прізвище та ініціали)

ЗМІСТ

Вступ	4
РОЗДІЛ 1. Сучасні технології процесу пастеризації молока	7
1.1. Технологічне призначення та основні закономірності процесу пастеризації молока	7
1.2. Сучасні методи пастеризації молока	11
1.3. Порівняльна характеристика існуючих пастеризаторів	15
1.4. Функціональна схема автоматизації системи керування ІЧ пастеризатором молока	26
РОЗДІЛ 2. Дослідження та моделювання інфрачервоного проточного пастеризатора молока	28
2.1. Вимоги до ІЧ нагрівача, камери та процесу ІЧ пастеризації	28
2.2. Будова та принцип дії камери комбінованого ІЧ пастеризатора	33
2.3. Розрахунок комбінованого ІЧ пастеризатора	38
2.3.1. Розрахунок параметрів камери ІЧ пастеризації	38
2.3.2. Розрахунок параметрів теплообмінної камери	51
2.4. Математична модель температурних режимів інфрачервоного пастеризатора молока	57
РОЗДІЛ 3. Вибір регулятора та обґрунтування параметрів його налаштувань.....	70
3.1. Вибір алгоритму керування.....	70
3.2. Реалізація алгоритму керування.....	71
3.2.1. Вибір пристроїв керування.....	71
3.2.2. Обґрунтування вибору датчика температури.....	73
РОЗДІЛ 4. Розробка цифрової системи керування.....	76
РОЗДІЛ 5. Розробка схеми електричної принципової та засобів людино-машинного інтерфейсу візуалізації процесу керування.....	83
5.1. Розробка схеми електричної принципової системи керування ІЧ пастеризатором молока.....	83
5.2. Розробка засобів візуалізації процесу керування ІЧ пастеризатором.....	87
РОЗДІЛ 6. Розрахунок економічної ефективності впровадження розробленої системи.....	91
Висновки.....	94
Література	95
Додатки.....	97

ВСТУП

Актуальність теми. В наш час перспективним напрямком удосконалення технологічного процесу пастеризації молока в умовах молокопереробних підприємств України варто вважати розробку електропастеризаторів. Високий ККД перетворення електричної енергії в теплову дозволяє знизити енерговитрати на проведення процесу, за орієнтованими оцінками, до 20...40 кВт·год/т. Устаткування для електропастеризації є компактним і надійним в експлуатації, а сучасні системи автоматики дозволяють точно реалізувати заданий режим процесу.

Можливі два варіанти методу електропастеризації – прямий і непрямий. При першому методі продукт нагрівається безпосередньо струмом, що проходить через нього, промислової чи підвищеної частоти, при другому продукт одержує тепло від нагрівача за допомогою ІЧ випромінювання. Розглянемо особливості цих варіантів більш детально.

Перший варіант – прямий нагрів продукту струмом – має очевидну перевагу перед всіма іншими методами пастеризації – можливістю забезпечення практично рівномірного температурного поля в усьому об'єму продукту, оскільки струм проходить через весь перетин продукту. Подібний метод – електроконтактний нагрів – вже порівняно давно вважається перспективним для харчової технології, зокрема, для теплової обробки м'ясопродуктів. Однак практична реалізація даного методу сполучена з деякими труднощами. Основні труднощі полягають у неминучому порушенні контакту між електродами та продуктом внаслідок ряду електрохімічних процесів, що протікають на електродах, зокрема, відкладення молочного каменю. Для запобігання цього ефекту пропонувалося піддавати електроди спеціальній обробці, наприклад, покривати їх платиновою черню. Іншими труднощами є значна зміна електропровідності харчових продуктів, зокрема молока, за умов підвищення

температури, що обумовлює нестабільність потужності нагрівання.

Електропастеризатори непрямого нагріву опором з трубчастими електронагрівачами (ТЕНами) забезпечують теплообмін конвекцією і теплопровідністю, що характерно для традиційних конвективних пароводяних пастеризаторів. Вони мають такі недоліки:

- нерівномірний нагрів, що приводить до підвищення температури, збільшення часу пастеризації, і, в свою чергу, негативно впливає на якість молока та призводить до збільшення теплових витрат та матеріалоємності;

- на поверхні ТЕНів можливий пригар за рахунок перегріву та активного відкладенню "молочного каменю".

Незважаючи на простоту конструкції та достатню високу електробезпеку, вони не знайшли широкого використання в промисловості.

У вітчизняній технологічній практиці вже з 80-х р. Для пастеризації молока і соків застосовували спеціальні апарати – актинизатори, в яких продукт послідовно проходив зону ІЧ нагріву і здобував температуру 70...80°C, а потім зону УФ-опромінювання для завершення пастеризації. Подібні апарати випускаються й закордонними фірмами. Зокрема, в апараті французької фірми Anti Lavall використовувався ІЧ випромінювач з $\lambda_m = 2,7$ мкм, що забезпечує велику глибину проникнення в продукт, отже, більш рівномірний прогрів продукту. Крім того, зазначене випромінювання менше відбивається від продукту і поглинається його білковою фракцією в порівнянні з випромінюванням лампи КІ – 220 – 1000, що сприяє підвищенню ККД процесу та якості пастеризованого продукту.

У роботі [7] встановлено, що 10...15% енергії ІЧ випромінювання в інтервалі довжин хвиль 0,6...1 мкм проникають у молоко на глибину 4 мм, але при цьому частка відбитого випромінювання складає 40...80%. Згідно з іншими літературними даними, коефіцієнт відбивання молока, що залежить від жирності продукту, знижується до 2...10% за умов збільшенні довжини хвилі понад 1,2 мкм, однак при цьому глибина проникнення значно зменшується – приблизно до 1

мм. Встановлено також, що з підвищенням температури пропускна здатність молока помітно зростає.

Вибір довжини хвилі джерела випромінювання, що відповідає максимуму поглинання ІЧ променів молоком, дає можливість інтенсифікувати процес пастеризації за температурно-часовими параметрами значно нижчими, ніж в апаратах посереднього нагріву.

Мета і задачі дослідження.

Мета досліджень полягає в теоретичному обґрунтуванні і вдосконаленні енергоекономічного технологічного процесу пастеризації молока із застосуванням ІЧ нагріву та його апаратного оформлення.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні ***задачі***:

- визначити напрямки удосконалення процесу пастеризації молока ІЧ випромінюванням та обґрунтувати спосіб пастеризації молока з поліпшеною геометрією випромінювання;
- встановити ступінь рівномірності температурного поля в камері ІЧ пастеризації, продуктивність та ККД процесу пастеризації молока ІЧ випромінюванням;
- встановити раціональні значення технологічних і конструктивних параметрів ІЧ пастеризаторів, а також режими роботи пастеризаційної установки;
- розробити систему автоматичного керування температурою в ІЧ пастеризаторі та визначити показники якості її роботи;
- оцінити економічну ефективність зазначеного впровадження.

Об'єктом дослідження є процес пастеризації молока за допомогою інфрачервоного нагріву продукту.

Предметом дослідження є взаємозв'язки і закономірності процесів керування і режимів роботи ІЧ пастеризатора на енергоефективність процесу пастеризації молока.

РОЗДІЛ 1

СУЧАСНІ ТЕХНОЛОГІЇ ПРОЦЕСУ ПАСТЕРИЗАЦІЇ МОЛОКА

1.1. Технологічне призначення та основні закономірності процесу пастеризації молока

Пастеризація – процес одноразового нагрівання рідин або харчових продуктів, зазвичай до температури 63-98°C, з витримкою на протязі деякого часу. Технологія була винайдена в середині XIX ст. французьким мікробіологом Луї Пастером. Мета пастеризації – знешкодження хвороботворних мікроорганізмів і пригнічення життєдіяльності мікроорганізмів, що викликають псування продуктів. Ефективність пастеризації визначається ступенем знищення хвороботворної (патогенної) мікрофлори.

При такій обробці дезактивуються ферменти, гинуть вегетативні форми мікроорганізмів, однак спори залишаються життєздатними та при виникненні сприятливих умов починають розвиватися. Тому пастеризовані продукти (молоко, пиво та ін.) зберігають при знижених температурах протягом обмеженого часу. Харчова цінність продуктів при пастеризації практично не змінюється.

В сучасній технології первинної обробки молока використовують різні режими теплової обробки (таблиця 1.1).

За температур, характерних для пастеризації, гине більшість мікробів, що викликають такі захворювання, як туберкульоз, дизентерія та різні шлунково-кишкові захворювання. У першу чергу припиняється життєдіяльність психрофільних (криофільних) мікроорганізмів, що викликають псування продукту при збереженні в охолодженому стані (при температурі -5...+5°C), що є першочерговою задачею пастеризації в технологічній практиці. У той же час багато термофільних бактерій, що виживають при температурах вище 45°C, витримують процес пастеризації, тобто стерилізація продукту не здійснюється.

Таблиця 1.1.

Види теплової обробки молока [4]

Вид теплової обробки	Температура, °C	Тривалість обробки, с
Термізація (підготовча процедура для знезараження молока на молокозавод)	63-65	15
Низькотемпературна тривала пастеризація	63	180
Високотемпературна пастеризація	72-90	15-20
Ультрапастеризація	135-140	2-4
Стерилізація (у тарі)	115-120	1200-1800

Винайдення ультрапастеризації (обробки молока за температури 135-140°C впродовж 2-4 секунд) дозволило не тільки зробити молоко абсолютно безпечним, та більш зручним і надійним продуктом за рахунок подовження строку його зберігання, але й розширило географічні межі споживання молока. Ультрапастеризоване молоко може зберігатися до 180 діб у закритій упаковці, крім того, воно не потребує обов'язкового зберігання в холоді – тому таке молоко можна доставляти у країни, де немає власного молочного виробництва, наприклад, на африканський континент, або у віддалені куточки країн, територія яких займає велику площу або має складний рельєф.

Як вже було зазначено вище, особливу небезпеку утворюють збудники туберкульозу, для яких молоко, отримане від ВРХ, є сприятливим середовищем для збереження та переносу мікробів. Збудники проникають у молоко не тільки у випадку туберкульозної поразки вимені, але й разом зі струмом крові від інших уражених органів та тканин. Стійкість мікобактерій туберкульозу до впливу зовнішніх фізико-хімічних факторів обумовлена особливостями їхньої зовнішньої структури. Стабільність форми та розміру мікроорганізму, його механічний й осмотичний захист забезпечуються існуванням багатошарової клітинної стінки, товщина якої у вірулентних бактерій складає 250 нм. Під клітинною стінкою розташована тришарова цитоплазматична мембрана з ліпопротеїдних комплексів, у якій протікають процеси, відповідальні за специфічність реакції мікобактерій на вплив зовнішнього середовища. Цитоплазма мікобактерій містить рибосоми

гранули, а також ліпідні включення; антигенні комплекси, що є в оболонках кліток, а також рибосоми забезпечують високу імуногенність бактерій туберкульозу. Вірулентність мікобактерій обумовлена великим змістом ліпідів у цитоплазмі та клітинній стінці, що досягає 40% сухої ваги бактерій. Імунохімічні властивості мікобактерій туберкульозу значною мірою визначаються змістом полісахаридних компонентів.

У молоці заражених корів може міститися до $5 \cdot 10^6$ мікобактерій туберкульозу в 1 мл. Одна корова, хвора туберкульозом, може виділити таку кількість життєздатних бактерій, що досить для інфікування молока від 100 корів. Молодняк заражається в основному через молоко та відвійки, отримані від хворих корів. Мікобактерії туберкульозу можуть залишатися життєдіяльними, в залежності від температури навколишнього середовища, до 100 днів у молоці та 160 днів у відвійках. Щоб уникнути поширення збудників туберкульозу молоко від корів, що реагують під час дослідження на туберкульоз, в усіх випадках підлягає знезаражуванню або переробці.

Існуючі способи пастеризації засновані на негативному впливі ряду зовнішніх факторів на життєдіяльність патогенних мікроорганізмів [24]. Так, на мікобактерії туберкульозу згубно впливає сонячне світло; влітку сонячні промені знешкоджують туберкульозних мікобактерій за 30 хв., навесні і восени за 1 год., взимку за 2 год. Особливо чуттєві мікобактерії до впливу короткохвильового УФ випромінювання; за умов опромінення тривалістю 30с гине понад 92% бактерій. Кип'ятіння знищує мікобактерії туберкульозу за дуже короткий час (практично миттєво). Сухе гаряче повітря при 100°C вбиває бактерії туберкульозу за 1 год.

Найбільш широко в технологічній практиці використовується вплив на мікобактерії високих температур протягом визначеного часу, хоча літературні дані за цим питанням можуть відрізнятися [13,23,24]. Так, нагрівання до 60°C приводить до загибелі мікобактерій туберкульозу за 30 хв., за іншими даними – через 40...50 хв. Під час нагрівання до 70°C мікобактерії гинуть через 20 хв., до 80°C – через 5 хв. В більшості випадків рекомендується короткочасна

пастеризація продукту протягом 15...20 с при 72...76°C, або миттєва – протягом 1...2 с при 85...95°C. За низької термостійкості продукту рекомендується тривала пастеризація – протягом 30 хв. При 63...65°C. Після пастеризації продукт підлягає охолодженню до 2...4°C, щоб уникнути розвитку в ньому залишкової мікрофлори.

Для оцінки ефективності процесу пастеризації використовується так званий коефіцієнт швидкості загибелі мікроорганізмів C :

$$C = \frac{1}{\theta} \cdot \ln \frac{N_0}{N_K} \quad (1.1)$$

де N_0 – початковий вміст бактерій в одиниці об'єму продукту, м^{-3} ;

N_K – кінцевий вміст бактерій після пастеризації, м^{-3} ;

θ – температура об'єкта пастеризації.

Необхідність введення цього критерію обумовлена тим, що в реальних умовах продукт містить мільйони бактерій, що не можуть загинути одночасно; крім того, у продукті можуть міститися компоненти або включення пастеризації, що ускладнюють процес. Зокрема, найбільших труднощів представляє пастеризація рідких продуктів, що мають тенденцію до утворення піни (наприклад, пива), оскільки піна є гарним теплоізолятором та перешкоджає прогріву мікроорганізмів. У цих випадках застосовуються спеціально розроблені режими пастеризації чи процес стерилізації продукту.

Таким чином, механізм й основні закономірності процесу пастеризації в даний час можна вважати встановленими, а вибір способу та режиму процесу повинен здійснюватися на основі цих знань. Однак при такому виборі варто брати до уваги і багато інших факторів – вид продукту, технологічні умови, економічність та екологічність процесу та ін. Існуючі способи пастеризації молока, різноманітні і мають специфічні особливості.

1.2. Сучасні методи пастеризації молока

Найбільш розповсюдженим методом пастеризації в сучасній технологічній практиці є *нагрівання об'єкта пастеризації в теплообмінниках* різних типів проміжним теплоносієм – гарячою водою або паром [14,23]. Нагрівання об'єкта пастеризації здійснюється за рахунок теплопередачі від теплоносія до об'єкта через поділяючу їх стінку.

Для підвищення продуктивності процесу пастеризації необхідно прагнути до збільшення коефіцієнту теплопередачі та площі поверхні теплообміну між теплоносієм та об'єктом пастеризації; способи досягнення цієї мети описані в літературі [18]. До них відносяться, зокрема, рифлення поверхні, штучна турбулізація потоку рідини і т.п. Здійснення таких заходів веде до ускладнення і подорожчання конструкції пастеризатора. Крім того, необхідно забезпечувати досить високу швидкість руху рідини в установці, що викликає збільшення гідравлічних втрат тиску.

Необхідність використання циркуляційного насоса веде до додаткового ускладнення установки та збільшення енерговитрат на проведення процесу пастеризації. Тому застосування описаного способу пастеризації є практично доцільним лише при великій продуктивності процесу в промислових умовах.

На сьогодні, у зв'язку із важким станом енергетики України у воєнний час, актуальною стала розробка нетрадиційних методів пастеризації, що характеризуються спрощеною конструкцією установок та зниженими енерговитратами на ведення процесу.

Метод ультразвукової пастеризації, у якому продукт піддається впливу ультразвуку з частотою більш 25 кГц, заснований на тому, що під дією ультразвуку виникає кавітація-розрив густини, що супроводжується утворенням дрібних пухирців, наповнених паром та газами, що містяться в рідині. Під час захоплення кавітаційних пухирців виникають ударні хвилі з амплітудою тиску до тисячі атмосфер, що володіють руйнівною дією, у тому числі на клітки

мікроорганізмів. Відповідно до формули Релея, максимальний тиск у рідині на відстані, рівному $1,587 \cdot R$ від центра пухирця, складає:

$$p_{\max} = 0.163 \cdot p_0 \left(\frac{R_0}{R} \right)^3, \quad (1.2)$$

де p_0 – гідравлічний тиск у рідині, Па;

R_0 – початковий радіус газового пухирця, м;

R – кінцевий радіус пухирця, м.

Так при $\frac{R_0}{R} = 30$ значення $p_{\max}$ досягає $4,5 \cdot 10^8$ Па = 4500 атм.

Однак застосування даного методу пастеризації обмежується істотним і різноманітним впливом ультразвуку на продукт, який пастеризується. Крім бактерицидного, ультразвук здійснює диспергуючу, емульгуючу та хімічну дію на продукт, що може привести до визначеної зміни їхнього складу та властивостей. Під час обробки молока ультразвуком може з'явиться присмак пряженого молока. Крім того, апаратура для ультразвукового опромінення є складною та дорогою, що мало прийнятно для фермерських господарств. Аналогічні недоліки присутні *методу пастеризації іонізуючим випромінюванням радіоактивних джерел*, наприклад, препаратів C^{60} и C^{137} . Для забезпечення необхідної ефективності пастеризації продукт опромінюється у тонкому шарі (до 2 мм) при низькій потужності випромінювання (приблизно 2 мДж). Таким методом обробки найчастіше досягається ефект повної стерилізації продукту. Однак застосування методу істотно обмежується шкідливою дією радіації на людину, що обумовлює необхідність прийняття рішучих заходів радіаційної гігієни в технологічній практиці.

Варто згадати також про *метод пастеризації ультрафіолетовим (УФ) випромінюванням* з довжиною хвилі менш 300 нм. Це випромінювання дає не тільки бактерицидний, але й біохімічний вплив; наприклад, УФ опромінення жиромістких продуктів приводить до утворення в них вітаміну Д, що застосовується для збагачення продукту, зокрема, питного молока, цим вітаміном.

Недоліком методу є його низька продуктивність, оскільки УФ випромінювання проникає в продукт на незначну глибину, тому продукт повинен опромінюватися в тонкому шарі (у виді стікаючої плівки). Крім того, для УФ опромінювання повинні застосовуватися спеціальні джерела – кварцові лампи, заповнені парами ртуті. Надійність цих джерел звичайно не висока, та за умов виходу їх з ладу виникає проблема утилізації.

Найбільш перспективним для практичного впровадження варто вважати *метод електропастеризації*, в якому використовується перетворення електричної енергії в теплову. При цьому можливий *прямий нагрів* продукту пропусканням через нього електричного струму, а також *непрямий нагрів джерелом інфрачервоного (ІЧ) випромінювання* у виді спірального випромінювача. Цей метод характеризується високим ККД та порівняльною простотою устаткування для його реалізації.

Зміст даної технології полягає в тому, що кожна складова молока має свій, притаманний тільки їй, спектр поглинання. Як наслідок, враховуючи руйнуючу дію ІЧ-випромінювання на органічні компоненти молока (жири, білки, вуглеводи і т.д.), можна проводити цілеспрямовану обробку молока, вибірково впливаючи на визначені складові. Руйнуючи визначені хімічні зв'язки, можна впливати на якість пастеризованого молока. Наприклад, знижувати вологоутримуючу здатність білків, що особливо важливо для виробництва сиру, знижувати або підвищувати сквашування, що важливо при виробництві питного молока або кисломолочних продуктів і т.п., що, в свою чергу, призводить до підвищення якості кінцевого продукту, зберігаючи при цьому такі важливі компоненти, як жири, білки, вуглеводи, вітаміни та мікроелементи.

Однак, використання такої технології стримувалось складністю виготовлення ІЧ-випромінювачів із заданими параметрами потужності та довжини хвилі випромінювання. Розвиток нанотехнологій та використання найновіших матеріалів дозволило виготовити інфрачервоні тепловиділяючі елементи (ІЧ-ТВЕЛи) із заданими шириною спектру та потужністю

випромінювання. Особливістю таких пастеризаторів є те, що блоком пастеризації в установках є секція ІЧ-нагріву, що складається з кварцових труб з інфрачервоними нагрівальними елементами, які виконані з ніхромового дроту або войлочно-графітного шнура, дозволяючих виготовляти нагрівачі з вузьким спектром ІЧ-випромінювання, орієнтованим на конкретні задачі. Наприклад, **оптимальна довжина хвилі для пастеризації питного молока складає від 2500 до 3500 нанометрів, при пастеризації молока для виробництва сиру – 1200-1500 нанометрів.**

Знезараження збудників бруцельозу та туберкульозу в молоці здійснюється при більш низьких температурах (77-80°C) та без витримки (в традиційних установках – при 90°C з обов'язковою витримкою 5 хвилин). Для роботи установка не потребує пари, системи підготовки гарячої води, витримувач.

Більш сильна бактерицидна дія ІЧ-випромінювання в порівнянні з традиційною тепловою обробкою пояснюється тим, що при використанні ІЧ нагріву, тепло до мікроорганізмів підводиться не тільки зовні, але й за рахунок поглинання, генерується зсередини самих мікроорганізмів, викликаючи, крім того, поляризацію їх структури. Під дією цих двох факторів (розвиток "внутрішнього тепла" і поляризації) мікроорганізми гинуть набагато швидше. *Процес пастеризації протікає на протязі 2-5 с при заданій температурі.* Ще однією перевагою ІЧ нагрівання є те, що вплив на продукт більш рівномірний, оскільки випромінювання проникає всередину одночасно по всьому об'єму. Завдяки миттєвій дії випромінювання з високою щільністю потоку енергії створюються необхідні умови для ліквідації токсичної і баластної мікрофлори, що підвищує, порівняно з іншими методами, термін зберігання продукту. При цьому захищаються від руйнування корисні біологічні структури.

Найбільш цінною складовою молока є білки. З підвищенням інтенсивності теплової дії в діапазоні температур 80-92°C, вміст загального та неказеїнового білку суттєво знижується після пастеризації традиційними методами. Вміст білків в молоці після ІЧ-обробки практично не змінюється.

Якість усіх молочних продуктів сильно залежить від стану жирової фази та мінерального складу молока. Висока якість молока після пастеризації ІЧ-нагрівом пояснюється м'якими умовами нагрівання, відсутністю інтенсивного пригару на нагрівальних поверхнях. Харчова якість молока (жирність та мінеральний склад) після ІЧ пастеризації при температурах до 85°C не змінюється, більше 85°C – змінюється менше, чим при традиційних способах обробки.

З усіх вітамінів, що містяться в молоці, найбільш чутливим до нагрівання є вітамін С. Він є й одним з найважливіших. Вміст цього вітаміну в молоці при пастеризації ІЧ-нагріванням при температурах до 70°C не змінюється, а в діапазоні температур 70-92°C знижується на 8%, при цьому вміст вітамінів В1, В2, В12 та інших практично не змінюється (при традиційних методах пастеризації вміст вітаміну С знижується на 11-16%).

На довоєнний період часу (до 2022 р.) розроблено і виготовлено понад 200 установок ІЧ електронагріву різних модифікацій і продуктивностей, більшість із яких успішно експлуатується.

1.3. Порівняльна характеристика існуючих пастеризаторів

Пастеризація здійснюється в апаратах – пастеризаторах – різних типів [18]. Найбільш поширені пластинчасті, трубчасті та відцентрові пастеризатори, у яких створюється швидке нагрівання до 100°C рідких продуктів (молока, вершків, соків, напоїв), що безупинно протікають тонким шаром між теплообмінними поверхнями. Після пастеризації зазначені продукти розфасовуються в герметично закупорену тару. Якщо ж пастеризації піддається вже розфасований у тару (банки, пляшки) продукт, то застосовується нагрівання парою з безперервним обертанням тари, замість парового нагрівання може використовуватися обробка у СВЧ полі.

Пластинчастий теплообмінний апарат складається із пакета теплообмінних пластин, які нанизані на горизонтальні штанги 7 (рис. 1.1), а своїми кінцями

затиснуті в стійки 3 і 9. В зібраному вигляді ці пластин затягнені в один пакет за допомогою стягуючої плити 8 і заживної гайки 10. Зазори між пластинами залежать від товщини резинових прокладок 13 (зазвичай складають 2...6 мм). Тонкі теплообмінні пластини апарати виготовлені штамповкою із листової нержавіючої сталі товщиною 1,1...1,4 мм і забезпечують достатньо високий теплообмін між сусідніми потоками рідин.

Через патрубок і кутовий отвір 4 молоко потрапляє в апарат, поступає в поздовжній його канал, який утворюється при стягненні пластин кутовими отворами, і рухається по ньому до граничної пластини 6, яка має глухий кут (без отвору). При цьому молоко розподіляється по непарних міжпластинних зазорах, утворених відповідним роз положенням кільцевих прокладок 5, які не дають змоги молоку потрапляти в парні зазори. Рухаючись вниз, молоко обтікає гофровані поверхні теплообмінних пластин, які обігріваються з іншої сторони гарячою водою. Внизу молоко виходить із зазорів в нижній поздовжній канал, утворений кутовими отворами 14, і витікає із апарата через патрубок.

Гаряча вода в апараті рухається назустріч молоку: поступає через патрубок, проходить по нижньому поздовжньому каналі, роз приділяється по парним міжпластинним зазорам і направляється по них вверх, а потім через верхній поздовжній канал і патрубок витікає із апарата.

Теплообмін між молоком і водою проходить через тонкі гофровані стінки пластин і молоко нагрівається чи охолоджується до потрібної температури.

Внаслідок розбірності конструкції, складеної в основному із стандартних штампованих пластин, можливі оперативна перекомпоновка апаратів і створення будь-яких схем роботи, відповідних потребам технологічного процесу.

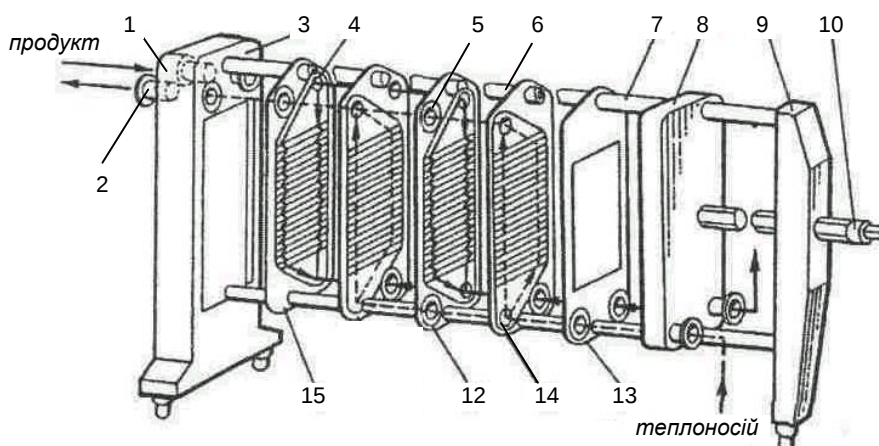


Рис. 1.1. Пластинчастий теплообмінний апарат:

1, 2, 11, 12 – штуцери; 3 – передня стійка; 4 – верхній кутовий отвір; 5 – кільцева резинова прокладка; 6 – гранична прокладка; 7 – штанга; 8 – стягуюча плита; 9 – задня стійка; 10 – гайка; 13 – велика резинова прокладка; 14 – нижній кутовий отвір; 15 – теплообмінна пластина

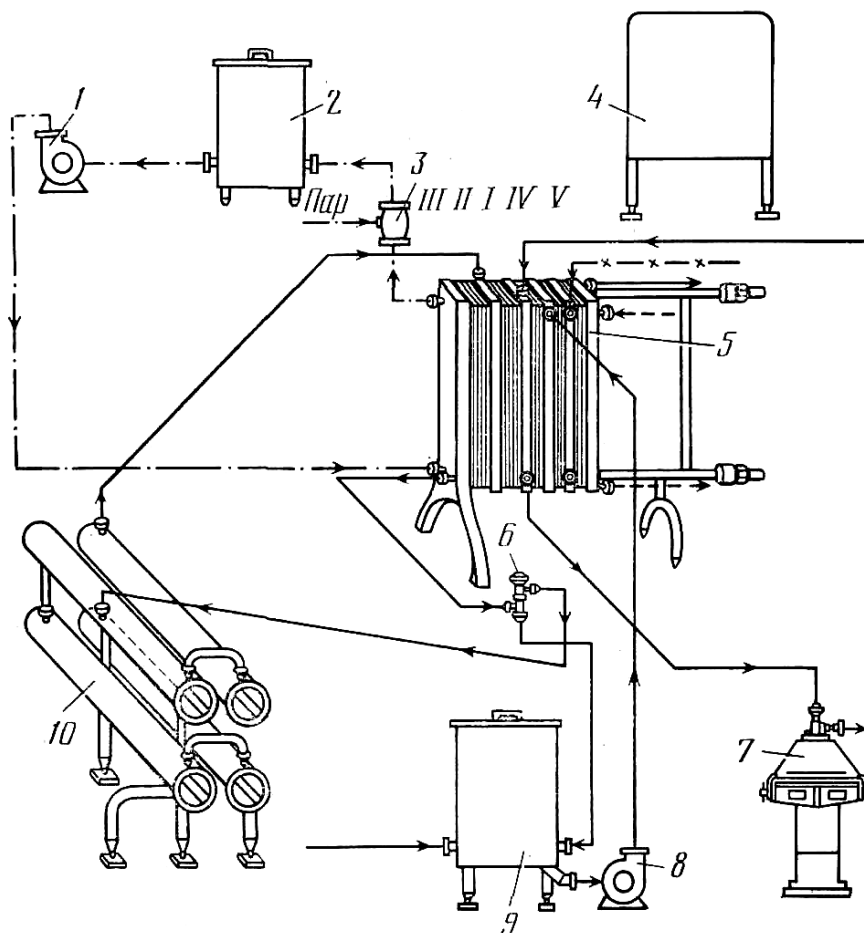


Рис. 1.2. Технологічна схема пастеризатора ОПФ-1:

1 – водяний насос; 2 – водонагрівач; 3 – інжектор; 4 – станція управління; 5 – пластинчастий апарат; 6 – клапан; 7 – сепаратор-очисник; 8 – відцентровий насос; 9 – зрівнювальний бачок; 10 – витримувач; I і II – станції регенерації; III – секція пастеризації; IV і V – секції охолодження.

Розглянемо повний цикл пастеризації і охолодження молока в пастеризаційно-холодильній установці ОПФ-1 продуктивністю 1000 л/ч з 5-хвилинною витримкою нагрітого молока (рис. 1.2). Молоко з танка або доїльної установки направляється в зрівнювальний бачок 9, відцентровим насосом 8 подається в першу секцію регенерації і рухається по молочному тракту, а по протилежному тракту пускають гарячу воду. Потім підігріте до температури $31...40^{\circ}$ поступає в сепаратор-очисник 7 для очистки від механічних частинок, потім потрапляє для подальшого нагріву в другу секцію регенерації і секцію пастеризації, де нагрівається до температури $85...90^{\circ}$. Після цього молоко поступає на автоматичний клапан 6 повернення недопастеризованого молока. За допомогою трубопроводів вихідні штуцера клапана з'єднані зі зрівнювальним баком і витримувачем. Клапан керує потоком молока в залежності від температури нагріву. Молоко в витримувач 10 поступає із секції пастеризації тільки в тому випадку, якщо його температура рівна чи більша заданому режиму пастеризації. Там воно знаходиться 5 хвилин і поступає в секцію регенерації для відведення тепла зустрічному потоку молока, яке поступає в теплообмінний апарат. Після цього молоко поступає по чергові в четверту і п'яту секції охолодження льодяною водою, де охолоджується до 8° і виходить з установки.

Режим процесу пастеризації і обробки молока підтримується автоматично ввімкненням або вимкненням частини нагрівачів електричного котла 2.

Приклади більш сучасного обладнання з теплообмінними апаратами різної конструкції та використанням в якості теплоносія гарячої води або пари, зображено на рис. 1.3, 1.4.

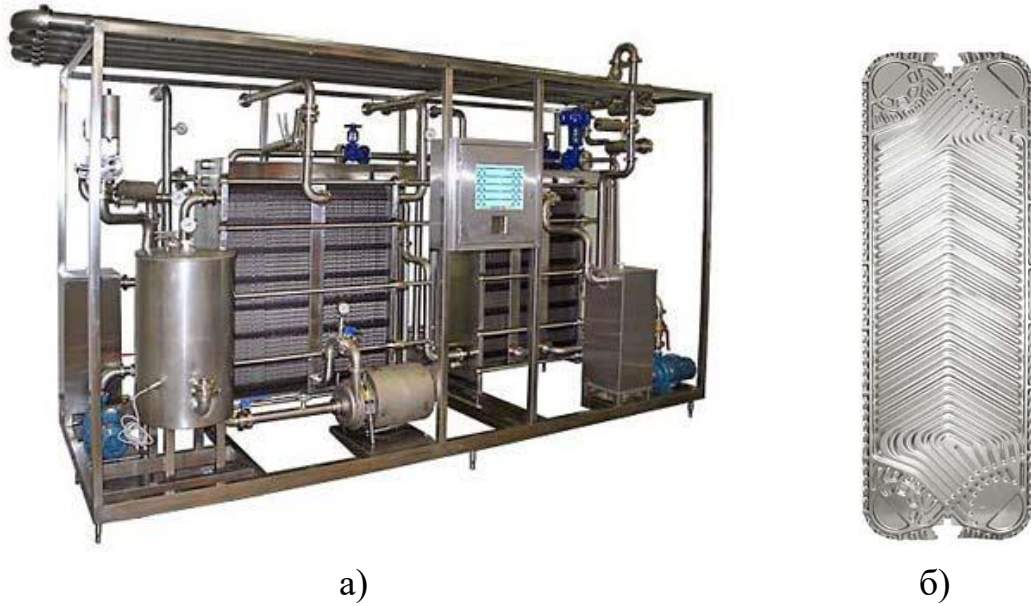


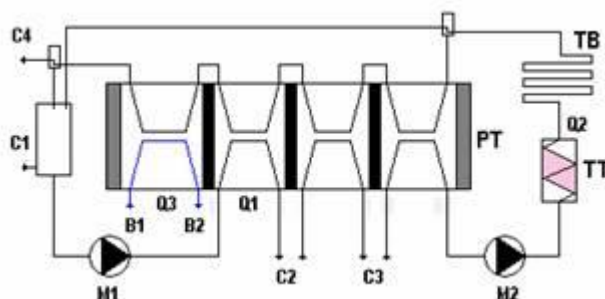
Рис. 1.3. Пластинчастий пастеризатор ВГ-15-ПОУ продуктивністю 15000 л/год. для молока та вершків (а) з пластинами теплообмінника П-0,36 з нержавіючої сталі AISI 304-L або AISI 316-L

Для пастеризаторів з принципом роботи, заснованим на використанні високотемпературних теплоносіїв (пара або гаряча вода), характерні наступні загальні недоліки:

- через використання гарячої води або пари як теплоносія необхідна наявність відповідного устаткування (парових котлів, водонагрівачів і т.п.);
- поверхневий характер нагрівання продукту механізмом теплопередачі обумовлює великі енерговитрати 50...70 кВт·год/т на підтримку необхідного температурного режиму обробки і нерівномірність температурного поля в продукті;
- для виходу установки на робочий режим потрібно значний час на прогрів всієї установки гарячим теплоносієм;
- парові пастеризаційні установки займають великі виробничі площі і потребують вживання заходів по забезпеченню техніки безпеки.



а)



б)

Рис. 1.4. Універсальна пластинчато-трубчаста пастеризаційно-охолоджувальна установка УТП-10 продуктивністю 10000 л/год.

(виробник – ООО "НОДЕСТ", Україна) з пластинчастим рекуператором та трубчастим теплообмінником-пастеризатором (а) та її технологічна схема (б)

РТ – рекуператор-теплообмінник; ТТ – трубчастий теплообмінник (секція пастеризатора); С1 – вхід продукту; С2 – подача на сепаратор; С3 – подача на гомогенізатор; С4 – вихід; ТВ – вхід теплоносія; В1 – вхід холодильного агенту; Q1 – витрата продукту; Q1 – витрата теплоносія; Q3 – витрата холодильного агенту; M1, M2 – насоси.

Інфрачервоні пастеризатори-зnezаражувачі присутні на ринку устаткування для первинної обробки молока більше 15 років та зарекомендували себе як високонадійні, ощадливі, прості в використанні установки. Досвід використання і експлуатації ІЧ-пастеризаторів дозволяє стверджувати, що на сьогоднішній день це одне з найперспективніших та ефективних устаткувань для пастеризації та зnezаражування молока в потоці без витримки з м'яким

температурним режимом і повною автоматизацією процесу пастеризації.

Загальний принцип роботи ІЧ-пастеризаторів є подібним до пастеризаторів з водяними або паровими теплообмінними апаратами, відрізняється лише спосіб нагрівання, температура та тривалість пастеризації.

Розглянемо технологічну схему ІЧ-пастеризатора типу УЗМ (рис. 1.5), розробленого науково-виробничим підприємством "Дайрі" (м. Харків, Україна) спільно з Інститутом експериментальної та клінічної ветеринарної медицини.

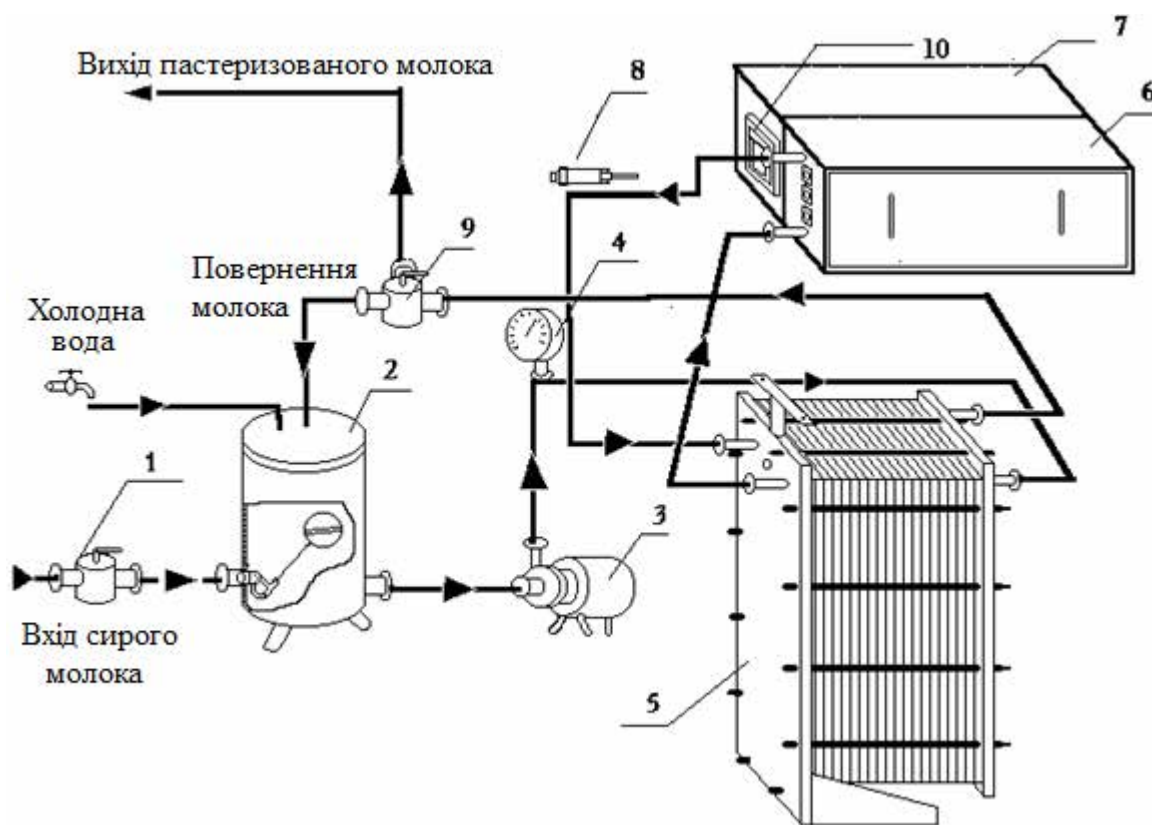
Установка являє собою технологічну лінію обробки молока в закритому потоці при автоматичному регулюванні технологічного процесу.

До складу установки входить: кран прохідний 1, бак прийомний 2, насос відцентровий 3, манометр електроконтактний 4, пластинчастий теплообмінний апарат 5, секція ІЧ електронагріву 6, пульт керування 7 із самописцем 10, давач температури 8, кран триходовий 9 і комплект трубопроводів.

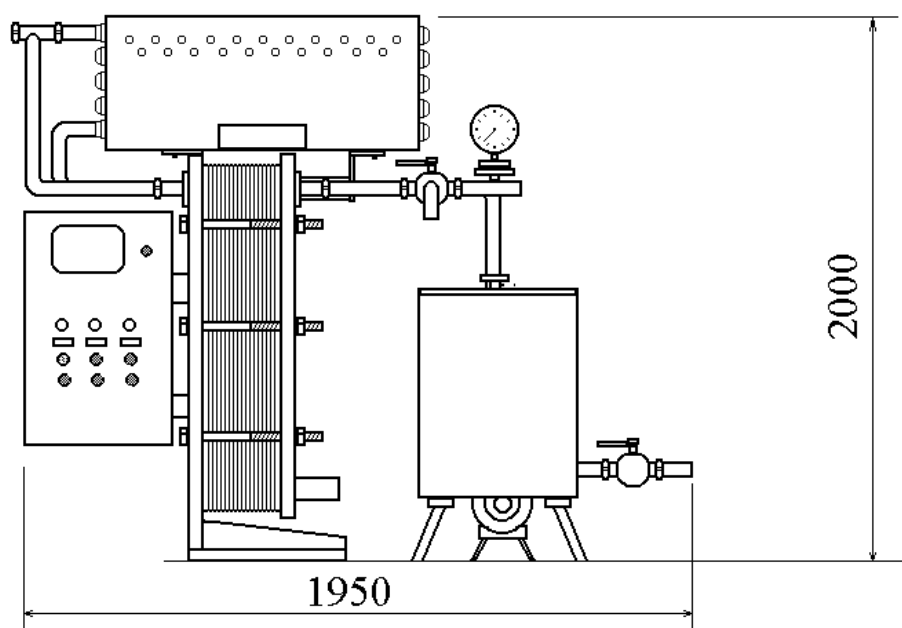
Робота передбачає наступні фази технологічного процесу: попереднє заповнення гідросистеми водою і її стерилізацією, пастеризацію молока, ополіскування, промивання гідросистеми розчином їдкого натрію й азотної кислоти з наступним ополіскуванням. Конструкція установок передбачає безрозбірне промивання гідросистеми миючими розчинами.

Джерелом тепла в установках є електрика. Спочатку молоко нагрівається за принципом регенерації вхідним теплим молоком, а потім, остаточно, у секції ІЧ електронагріву, що складається з нержавіючої проточної частини та ІЧ-нагрівачів.

ІЧ-нагрівачі виконані з кварцових труб з ніхромовою спіраллю із заданим спектром ІЧ-випромінювання. Кварцові труби мають спеціальне плівкове антипригарне покриття із фторопласту (рис. 1.6).



а)



б)

Рис. 1.5. ІЧ-пастеризатор типу УЗМ (а) та його габаритні розміри (б)

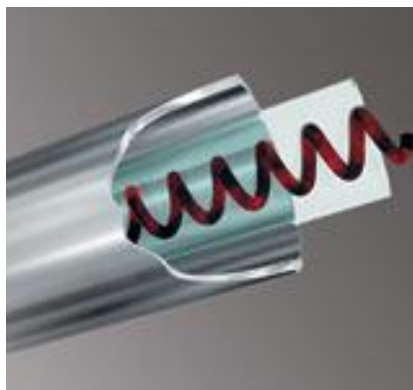


Рис. 1.6. Конструкція ІЧ-нагрівача

Інтенсивна короткочасна обробка шару молока ІЧ променями заданої довжини при температурі, що щадить, дозволяє в процесі обробки зберегти живильну цінність, смакові й технологічні властивості молока.

Технічні характеристики ІЧ-пастеризаторів УЗМ наведені в табл. 1.2.

Таблиця 1.2.

Технічні характеристики ІЧ-пастеризаторів типу УЗМ

Показники	УЗМ-5,0	УЗМ-3,0	УЗМ-2,0
Продуктивність, л/год.	5000	3000	2000
Початкова температура молока, °C	+6...+30	+6...+30	+6...+30
Температура обробки молока, °C			
- при туберкульозі	79±0,5	79±0,5	79±0,5
- при лейкозі	79±0,5	79±0,5	79±0,5
- при пастеризації	70...80	70...80	70...80
Температура продукту на виході, °C	+16...+40	+16...+40	+16...+40
Встановлена потужність, кВт	50	38	29
Питоме споживання електроенергії на обробку 1 т молока, кВт·год/т	12...9	14...11	15...12
Вага установки, кг	700	450	350
Займана площа, м ²	4	4	3
Орієнтовна ціна, грн	68000	53000	44000

Подібну конструкцію має ІЧ-пастеризатор-охолоджувач А1-ОПЕ, але з іншим матеріалом спіралі кварцових труб – з войлочно-графітною спіраллю (рис. 1.7).



Рис. 1.7. ІЧ-пастеризатор-охолоджувач А1-ОПЕ

Таблиця 1.3.

Технічні характеристики ІЧ-пастеризатора-охолоджувача А1-ОПЕ

Продуктивність, л/год	1000	1500	3000
Споживана потужність, кВт	24	28	45
Режим пастеризації, °С	до 95°С (задається з ПУ)		
Точність підтримання режиму пастеризації, °С	0,5		
Температура продукту на виході, °С	24-30 (залежить від температури охолоджувача)		
Режим стерилізації системи, °С	95		
Живлення	Змінний трифазний струм 380 в/50 Гц		
Охолоджувач	"льодяна вода" (+1...+3°С), артезіанська вода та ін.		
Габаритні розміри (L,B,H)	1720x970x1955		

Головною перевагою ІЧ-пастеризаторів є те, що пастеризація відбувається в потоці без витримки часу (при температурі 79,5°С).

Порівнюючи якість молока, пастеризованого за допомогою пастеризаторів з теплообмінниками з парою або водою в якості нагрівального елемента, та ІЧ-пастеризаторів, можна зробити висновок про більшу ефективність використання останніх (Додаток А1).

Таблиця 1.4.

Порівняльна характеристика енерговитрат ІЧ
та традиційних пастеризаторів, кВт·год./т

Вид установки	Вид технологічної операції обробки молока	Реальні		Перспективні	
		Початкова температура молока, °С			
		10	30	10	30
Традиційні ємнісні установки	Без промивки і охолодження	176	132	125	93
	Без промивки з охолодженням	352	264	250	186
	З промивкою без охолодження	234	176	166	124
	З промивкою без охолодження	586	440	416	310
	Середнє значення	337	253	239	178
Поточні традиційні установки з рекуперацією тепла	Без промивки	38	30	19	15
	З промивкою	51	40	25	20
	Середнє значення	44,5	35	22	17,5
		Базова конструкція		Принципова можливість	
ІЧ-пастеризатор-знезаражувач	Без промивки	15	12	11	8
	З промивкою	19	16	14	10
	Середнє значення	17	14	12,5	9

Розшифровка обладнання, вказаного в таблиці:

Ємнісні теплообмінні установки:

- ВДП-300/Г6-ОПБ-300/ місткістю 300 літрів;
- ВДП-600/Г6-ОПБ-600/ місткістю 600 літрів;
- ВДП-1000/Г6-ОПБ-1000/ місткістю 1000 літрів;

Трубчасті теплообмінні установки:

- Т1-ОУК – продуктивністю 2500 л/год.;
- Т1-ОУН – продуктивністю 5000 л/год.;
- А1-ОТЛ-5 – продуктивністю 5000 л/год.;

Пластинчасті теплообмінні установки:

- пастеризаційно-охолоджувальні установки ОПФ-1-300 продуктивністю 1000 л/год.;
- Б6-ОП2-Ф1 (електричний варіант ОПФ-1-300);
- А1-ОКЛ-3 продуктивністю 3000 л/год.;
- А1-ОК2Л-5 продуктивністю 5000 л/год.

Як видно з таблиці 1.4, за енерговитратами установки ІЧ-пастеризації набагато випереджають в економічності традиційні пастеризатори. Слід зазначити, що в таблиці енерговитрати традиційних пастеризаторів з рекуперацією наведені для режиму "пастеризація", а для ІЧ-пастеризаторів – в режимі "знезараження". Якщо для традиційних пастеризаторів забезпечити режим знезараження при 90°C з витримкою 5 хв., їх відставання від ІЧ-пастеризаторів стане ще більшим.

1.4. Функціональна схема автоматизації системи керування ІЧ пастеризатором молока

Робочий процес пастеризації молока в установці з ІЧ пастеризатором розглянемо на функціональній схемі автоматизації системи керування ІЧ пастеризатора (рис. 1.8.).

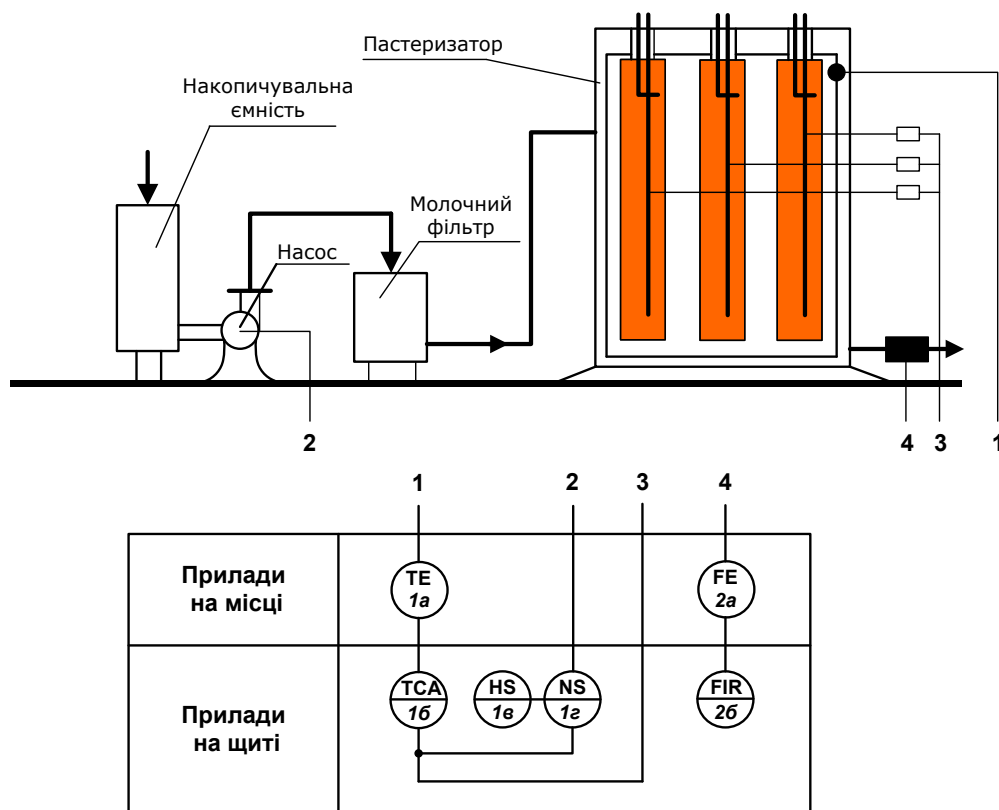


Рис. 1.8. Функціонально-технологічна схема автоматизації пастеризатора

Із накопичувальної ємності молоко відцентровим насосом подається через молочний фільтр на вхід змієвикового теплообмінника ІЧ пастеризатора, де нагрівається до температури 52°C і поступає безпосередньо в камеру ІЧ пастеризації, де відбувається процес його пастеризації при температурі $79\pm 0,5^{\circ}\text{C}$ (максимальна температура 95°C).

РОЗДІЛ 2

ДОСЛІДЖЕННЯ ТА МОДЕЛЮВАННЯ ІНФРАЧЕРВОНОГО ПРОТОЧНОГО ПАСТЕРИЗАТОРА МОЛОКА

2.1. Вимоги до ІЧ нагрівача, камери та процесу ІЧ пастеризації

На підставі проведених теоретичних та експериментальних досліджень [13,23] були сформульовані технологічні вимоги до пастеризаційної установки, в якій ІЧ нагрівач встановлюється безпосередньо в потік молока, що пастеризується.

Встановлено, що для забезпечення рівномірності температурного поля продукту, що пастеризується, режим його плинку повинен бути турбулентним, за якого число Рейнольдса задовольняє умову $Re > 2200$ [21]. Під час перебування в зоні опромінення не менше 3 с (див. нижче) швидкість руху потоку молока з довжиною зони 1,5 м не повинна перевищувати 0,4 м/с; це означає, що ефективний діаметр поперечного перерізу потоку повинен бути не менше $d=14$ мм. В цих умовах товщина в'язкого підшару плинку продукту складає $\delta_v \approx 0,2$ мм, що достатньо для забезпечення рівномірності прогріву продукту, оскільки перепад температури при цьому складе $t = 0,4^\circ\text{C}$ [21].

Для ефективності процесу ІЧ пастеризації молока нагрівач повинен випромінювати електромагнітні хвилі в межах 2,2...2,5 мкм, при цьому досягається максимальне проникнення ІЧ променів у молоко.

При використанні ніхрому в якості матеріалу спіралі діаметр проводу повинен бути в межах 0,7...1,3 мм, а коефіцієнт навивки спіралі може складати 5...6.

В якості матеріалу, з якого виготовляється колба ІЧ нагрівача, необхідно використовувати кварцове скло марки КІ, яке максимально пропускає ІЧ випромінювання в межах 0,76...3,85 мкм. З метою покращення умов технічного обслуговування нагрівачів, а також для усунення пригару молока на поверхні

нагрівача, необхідно покрити зовнішню колбу нагрівача **фторопластовою плівкою**, яка в запропонованих межах ІЧ випромінювання максимально пропускає електромагнітні хвилі.

Камера ІЧ пастеризації повинна мати циліндричну форму та бути виготовлена з нержавіючої сталі. З метою підвищення ефективності процесу ІЧ пастеризації, та зменшення енерговитрат на обробку молока, рекомендовано камеру ІЧ пастеризації виготовляти з двох камер (внутрішньої та зовнішньої). У внутрішній камері встановлюються ІЧ нагрівачі та для підвищення турбулентності потоку молока та розміщуються турбулентні решітки.

У зовнішній камері потрібно передбачити попередній прогрів сирого молока пастеризованим, для цього потрібно встановити змієвиковий теплообмінник, в який подається сире молоко.

Вимоги до процесу пастеризації молока.

Для попереднього нагрівання сирого молока в теплообміннику змієвикового типу температура молока повинна підвищуватися до 52°C. Наступним етапом теплової обробки молока є дія ІЧ випромінювання у внутрішній камері пастеризації, пастеризація повинна здійснюватися за температурою $79 \pm 0,5^\circ\text{C}$ без витримки в часі. Продуктивність пастеризаційної установки повинна знаходитися в межах 100...600 л/год.

Використання теплопередачі випромінюванням для пастеризації молока у межах ІЧ спектра довжиною хвилі 0,76...10 мкм дозволяє одночасно інтенсивно нагрівати весь об'єм молока, що протікає, і, отже, безпосередньо впливати на молоко.

Вибір довжини хвилі джерела випромінювань, що відповідає максимуму поглинання ІЧ променів молоком, створює сприятливі умови для інтенсифікації процесу пастеризації за температурно-часових параметрах більш низьких, ніж в апаратах непрямого нагрівання. Процес пастеризації в такому апараті може бути описаний аналітично наступним рівнянням

$$Pa_{\text{наст}} + Pa_{\text{вод}} + Pa_{\text{рег}} \geq 1. \quad (2.1)$$

Оскільки характер теплового впливу при теплопередачі випромінюванням відмінний від теплопередачі теплопровідністю і конвекцією, що складають рівняння мають вид:

$$Pa_{ПАСТ} = \int_{60}^{\theta_{e.n.}} \frac{\partial t}{z}; \quad (2.2)$$

$$Pa_{ВД} = \frac{t_{вид.}}{z_{вид.}}; \quad (2.3)$$

$$Pa_{РЕГ} = \int_{\theta_m}^{60} \frac{\partial t}{z}; \quad (2.4)$$

де $\theta_{e.n.}$ – температура пастеризації, яка є температурою інактивації мікроорганізму під час безпосереднього теплового впливу на нього;

θ_m – температура загальної маси молока.

Якщо коефіцієнти поглинання молока і мікроорганізмів неоднакові, $\theta_{e.n.}$ повинна бути відмінною від температури загальної маси молока θ_m , що дозволяє за будь-яких інших температур одержувати бактерицидний ефект [23]. У цьому проявляється виборча дія ІЧ променів на мікроорганізми. Тому

$$\theta_m = \theta_{e.n.} \pm \theta_{виб.}; \quad (2.5)$$

тоді як за звичайної пастеризації

$$\theta_m = \theta_n$$

Але не виключено, що поглинаюча здатність мікроорганізму і молока рівні, тому що в хімічний склад бактерій входять такі елементи, як вода (80-81%), органічні речовини, білок, цукор, жир. З огляду на вищесказане, рівняння (2.1) може бути представлене як

$$\int_{60}^{\theta_{e.n.}} \frac{\partial t}{z} + \frac{t_{вид.}}{z_{вид.}} + \int_{\theta_m}^{60} \frac{\partial t}{z} \geq 1; \quad (2.6)$$

З урахуванням того, що ІЧ нагрівання молока відбувається одночасно у всьому потоці, гарантована рівномірність розподілу температури і витримування може бути виключено (короткочасна пастеризація).

Крім того, для зменшення витрат електричної енергії, додатковий пастеризаційний ефект можна одержати у вихідній частині регенератора, тобто мати

$$Pa_{рег.} = \int_{60}^{\theta_{рег.}} \frac{\partial t}{z}; \quad (2.7)$$

тоді вираз (2.6) можна представити як

$$\int_{60}^{\theta_{рег.}} \frac{\partial t}{z} + \int_{60}^{\theta_{e.n.}} \frac{\partial t}{z} + \int_{\theta_m}^{60} \frac{\partial t}{z} \geq 1. \quad (2.8)$$

Рівняння (2.8) є вихідним для одержання умов оптимізації режимів пастеризації ІЧ нагріванням.

Отримаємо вираз для визначень $t_{e.n.}$ при пастеризації ІЧ нагріванням. Рівняння теплового балансу проточного апарата такого типу можна представити так

$$Gc\rho\partial\theta = \sigma_0\varepsilon_{np.}\partial H_{12}10^8 \left[\left(\frac{T_{en.}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{en.}}{100} \right)^4 \right] + \alpha_T(\theta_{en.} - \theta_{en.})\partial H_{12}. \quad (2.9)$$

де σ_0 – постійна Стефана-Больцмана, рівна $5,67 \cdot 10^{-8}$ Вт/м²·К⁻⁴;

∂H_{12} - взаємна площа теплообміну, м²;

ε_{np} – приведений ступінь чорноти ІЧ нагрівача і потоку рідини, що пастеризується;

$T_{en.}$, $T_{en.}$ - відповідно абсолютні температури тіла розжарення і рідини, що пастеризується, К;

α_T - коефіцієнт тепловіддачі від стінки нагрівача, Вт/(м²·К).

Бактерицидний ефект виявляється тільки за $\theta_{en.} > 60^\circ\text{C}$, чому відповідає вираз (2.8). Другий доданок визначає умови нагрівання в пастеризаційній камері.

Для досягнення необхідного ефекту пастеризації рідина омиває поверхню H_{12} за час t . Отже, за час ∂t вона пройде ∂H . Під час рівномірного руху

$$\frac{\partial H}{\partial t} = \frac{H_{12}}{t_{en}}, \text{ тому } \partial H = \partial t \frac{H_{12}}{t_{en}}. \quad (2.9)$$

$$Gc\rho\partial\theta = (\alpha_L + \alpha_T)\partial t \frac{H_{12}}{t_{en}}(\theta_{en.} - \theta_{en.}), \text{ звідки}$$

$$\partial t = \frac{Gc\rho\partial\theta t_{en}}{(\alpha_L + \alpha_T)H_{12}(\theta_{en.} + \theta_{en.})} = \frac{Gc\rho t_{en}}{(\alpha_L + \alpha_T)H_{12}} \times \frac{\partial\theta}{(\theta_{en.} + \theta_{en.})}. \quad (2.10)$$

Виносимо постійні величини за знак інтеграла

$$Pa = \frac{Gc\rho t_{en}}{(\alpha_L + \alpha_T)H_{12}} \int_{\theta_{рег.}}^{\theta_{e.n.}} e^{(-\alpha+\beta\theta)} \frac{\partial\theta}{\theta_{en.} - \theta_{en.}}. \quad (2.11)$$

У випадку завершення процесу $Pa = 1$.

Тоді час $t_{en.}$, достатній для обробки молока, дорівнює

$$Pa = \frac{Gc\rho t_{en}}{(\alpha_L + \alpha_T)H_{12}} \int_{\theta_{рег.}}^{\theta_{e.n.}} e^{(-\alpha+\beta\theta)} \frac{\partial\theta}{\theta_{en.} - \theta_{en.}}. \quad (2.11)$$

$$t_{en.} = \frac{(\alpha_L + \alpha_T)H_{12}}{Gc\rho \int_{\theta_{рег.}}^{\theta_{e.n.}} e^{(-\alpha+\beta\theta)} \frac{\partial\theta}{\theta_{en.} - \theta_{en.}}}. \quad (2.12)$$

$$t_{en.} = \frac{1}{\Omega_{випр.} [S_1]_{\theta_{рег.}}^{\theta_{en.}}}. \quad (2.13)$$

Це частина часу перебування молока в апараті, що відповідає пастеризаційному ефекту, тобто від 60°C до $\theta_{en.}$.

Температура тіла розжарення $\theta_{en.}$, максимум випромінювальної здатності випромінювача за λ_{max} повинні відповідати оптичним характеристикам оброблюваної рідини для того, щоб збільшити глибину пропускання, зменшити на відображення і відповідно збільшити α_L – коефіцієнт теплопередачі випромінюванням.

За умов невиконання цих вимог ефективність ІЧ термообробки значно знижується. Тому для обґрунтування режиму ІЧ пастеризації необхідно погодити оптичні характеристики молока і спектральні характеристики ІЧ випромінювача, визначити оптимальні умови теплообміну після чого за допомогою рівняння (2.13) встановити час пастеризації $t_{\text{сп.}}$.

2.2. Будова та принцип дії камери комбінованого ІЧ пастеризатора

До складу установки для пастеризації молока (рис. 2.1) входить циліндричний вертикальний корпус, верхня та нижня кришка, ІЧ нагрівачі у вигляді прозорі для ІЧ променів трубки, усередині якої знаходиться джерело ІЧ випромінювання – ніхромові спіраль, деталі кріплення і елементи ущільнення, вихідний патрубок, відцентровий насос, додатково забезпечений камерою ІЧ пастеризації, концентрично розташованою усередині циліндричного вертикального корпусу з зазором, утворюючи периферійний об'єм, в якому на 0.50...0.55 висоти кільцевої камери розташована навита в спіраль змійовикова трубка, вхідний кінець якої закріплений в отворі нижньої кришки і з'єднаний з вихідним штуцером відцентрового насоса, а вихідний – герметично закріплений в отворі днища кільцевої камери.

У внутрішньому об'ємі кільцевої камери розміщений блок ІЧ нагрівачів у вигляді пучка з 7 трубок (рис. 2.2), консольно закріплених в отворах верхньої кришки, центри яких розміщені в вершинах правильного шестикутника та в центрі, вписаного в коло діаметром $d_{\text{кола}} \leq (D_{\text{кільц.кам.}} - 2 \cdot d_{\text{труб}})$ верхньої кришки, з можливістю синхронного ексцентричного зміщення кожної з трубок блока ІЧ нагрівачів в вертикальній площині відносно повздовжньої осі кільцевої камери. Крім того, у внутрішньому об'ємі кільцевої камери послідовно один над одним розміщено пакет перфорованих турбулізаторів, закріплених на зубоподібних виступах, рівномірно розподілених по внутрішньому периметру кільцевої камери

в горизонтальній площині. Вузли з'єднання затискачів і трубок блока ІЧ нагрівачів, винесені з робочої зони корпусу і розташовані в повітряному проміжку, утвореному верхньою кришкою і верхньою кромкою кільцевої камери.

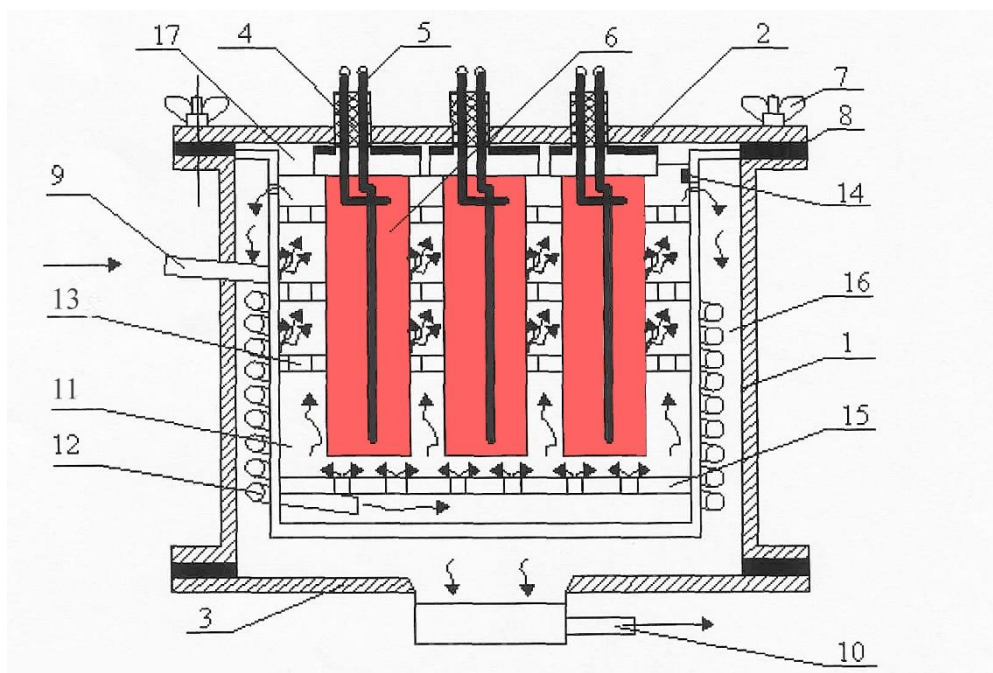


Рис. 2.1. Технологічна схема ІЧ пастеризатора:

1 – корпус; 2 – верхня кришка; 3 – нижня кришка; 4 – блок ІЧ нагрівачів; 5 – ІЧ нагрівач; 6 – трубка ІЧ нагрівача; 7 – кріплення; 8 – ущільнююча прокладка; 9 – вхідний патрубок; 10 – вихідний патрубок; 11 – камера ІЧ пастеризації; 12 – змієвиковий теплообмінник; 13 – турбулізатор; 14 – давач температури; 15 – турбулентна решітка; 16 – теплообмінна камера; 17 – повітряний проміжок

При цьому внутрішня поверхня циліндричного вертикального корпусу, верхньої і нижньої кришки вкриті шаром термостійкого електроізоляційного матеріалу, нечутливого до кислого середовища за температури 100..150°C. Для синхронізованої зміни ексцентриситету трубок блока ІЧ нагрівачів, пристрій забезпечений центральним приводом, закріпленим на верхній кришці, при чому трубки блока ІЧ нагрівачів виготовлені у вигляді урізаного конуса, оберненого більшою основою до верхньої кришки, а крок навивки спіралей ІЧ нагрівачів виконаний зменшеним в напрямку більшої основи трубок, починаючи з 0,5...0,6 висоти останніх.

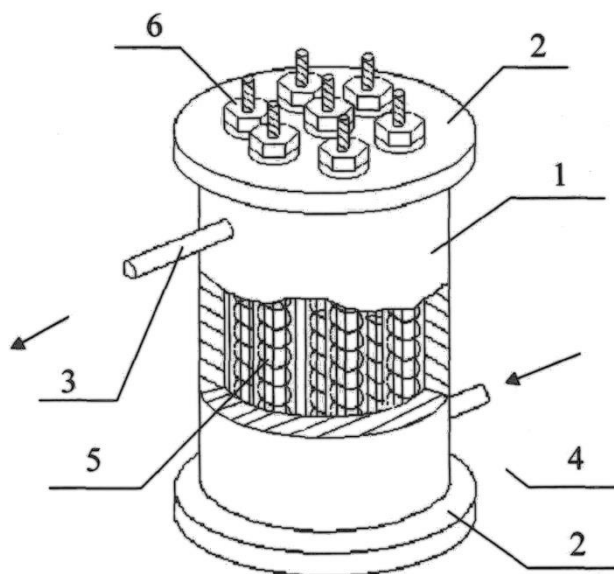


Рис. 2.2. Модель проточного ІЧ пастеризатора:

1 – камера нагріву; 2 – фланці; 3, 4 – вихідний та вхідний патрубки відповідно; 5 – ІЧ нагрівач; 6 – гайка

Принцип дії камери ІЧ пастеризації.

Циркуляційний насос подає молоко, що підлягає пастеризації, по каналу 9 який переходить у змієвиковий теплообмінник 12 і потрапляє в камеру ІЧ пастеризації (рис. 2.1). Змієвиковий теплообмінник розташований на 0,5...0,55 висоти камери ІЧ пастеризації. Молоко проходить через отвори перфорованого пакета турбулізаторів 13, розташованих один над одним у внутрішньому об'ємі камери ІЧ пастеризації 11.

Пропастеризоване молоко витісняється більш холодним молоком з внутрішнього об'єму камери ІЧ пастеризації 11 і перетікає у теплообмінну ІЧ камеру, омиває поверхню змієвикової трубки 12, в якій проходить більш холодне молоко, що подається циркуляційним насосом для пастеризації у внутрішній об'єм камери ІЧ пастеризації 11, і адсорбує через стінки змієвикової трубки 12 теплову енергію вже пропастеризованого молока, яке виходить через вихідний патрубок 10.

Наявність перфорованих турбулізаторів 13 у внутрішньому об'ємі камери

ІЧ пастеризації 11 забезпечує активне перемішування молока в процесі його руху від днища до верхньої кромки камери ІЧ пастеризації і вирівнювання температурного поля, як у процесі роботи пастеризатора в номінальному режимі, так і в процесі його запуску в роботу.

Таким чином використання даної установки для пастеризації, дозволяє підвищувати якість пастеризації молока за рахунок турбулізації потоку, що омиває знизу вверх зовнішню поверхню коридорного пучка трубок 6, блока ІЧ нагрівників 4, а також за рахунок попереднього підігріву молока до 52°C , починаючи з 0,55...0,60 висоти трубок 6, що забезпечує більш ефективний режим пастеризації, збільшуючи коефіцієнт поглинання ІЧ спектру теплим молоком. Крім того попередній підігрів молока, що подається у внутрішній об'єм камери ІЧ пастеризації 11 на пастеризацію шляхом рекуперації енергії пропастеризованого молока, в змійовиковій трубці 12, дозволяє впроваджувати енергоощадливу технологію пастеризації з більш рівномірним тепловим полем блока ІЧ нагрівачів, що забезпечується пакетом перфорованих турбулізаторів 13.

На рис. 2.3 представлена епюра внутрішнього температурного поля за висотою h циліндричного вертикального корпусу. Суцільні лінії – тепло від ІЧ нагрівачів, пунктирні – тепло від пастеризованого молока.

Основною задачею запропонованої установки є підвищення якості термічної обробки високодисперсних систем і рідинних розчинів, більш ефективно використовувати енергоносії, а також запропонувати пастеризатор, який може бути базовою моделлю уніфікованого типового ряду ІЧ пастеризаторів.

Це стало можливим за рахунок:

- більш раціонального поєднання традиційної енергетики (живлення від мережі) та використання вторинних енергоресурсів (утилізація теплової енергії пастеризованого молока);
- активної турбулізації маси молока, що подається циркуляційним насосом у внутрішній об'єм кільцевої камери;
- винесення вузлів з'єднання затискачів і трубок ІЧ нагрівача в неробочий

повітряний проміжок між верхньою кришкою і верхньою кромкою кільцевої камери;

- регулювання температури нагріву за рахунок зміни ексцентриситету блока трубок з ІЧ нагрівачами;
- вирівнювання градієнтів температурного поля у внутрішньому об'ємі кільцевої камери;
- можливості регулювання продуктивності пастеризатора;
- підвищення технологічної надійності; уніфікації елементів і режимів пастеризації.

Виготовлення ІЧ-спектру пастеризаторів молока розширить можливість їх використання як у великих спеціалізованих господарствах, так і фермерських і приватних господарствах.

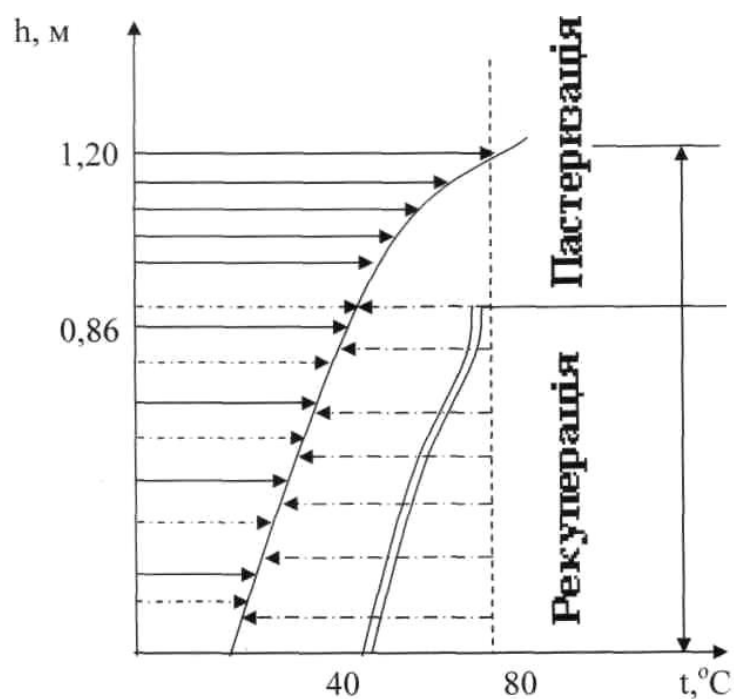


Рис. 2.3. Епюра внутрішнього температурного поля ІЧ камери

2.3. Розрахунок комбінованого ІЧ пастеризатора

2.3.1. Розрахунок параметрів камери ІЧ пастеризації

Використання теплопередачі випромінюванням для пастеризації молока в ІЧ області спектру, дозволяє одночасно нагрівати весь об'єм протікаючого молока, і, відповідно безпосередньо здійснювати теплову дію на молоко.

Вибір довжини хвилі джерела випромінювання, що відповідає максимуму поглинання ІЧ променів молоком, дає можливість інтенсифікувати процес пастеризації за температурно-часовими параметрами значно нижчими, ніж в апаратах посереднього нагріву.

Температура джерела ІЧ випромінювання та максимум випромінюючих його властивостей повинні відповідати оптичним характеристикам пастеризованої рідини для того, щоб збільшити глибину проникнення та відповідно збільшити коефіцієнт теплопередачі випромінюванням. За умов невиконання цих вимог ефективність ІЧ пастеризації значно знижується.

Тому для здійснення ІЧ пастеризації необхідно узгодити оптичні характеристики молока та спектральні характеристики ІЧ випромінювача (температури нагріву джерела ІЧ випромінювання - ніхромової спіралі).

У запропонованій установці, на відміну від описаної в п. 1.3, змінена геометрія ІЧ опромінення продукту, відповідно до цього змінена і конструкція ІЧ випромінювача. Розрахункові параметри цієї конструкції повинні забезпечувати температуру спіралі, якій відповідає необхідна довжина хвилі максимуму ІЧ випромінювання.

Об'єкт пастеризації (молоко) протікає всередині труби 1 (рис. 2.4) довжиною l з внутрішнім діаметром D з визначеною швидкістю v . Всередині труби розміщений ІЧ випромінювач у кварцовій оболонці 2 із зовнішнім діаметром d , що представляє собою ніхромову спіраль 3 з числом витків N і діаметром d_c , навиту на кварцову трубку з зовнішнім діаметром d_0 . Нагрівач живиться від мережі змінного струму з напругою $U = 220$ В; потужність нагрівача

розраховується таким чином, щоб максимум інтенсивності ІЧ випромінювання від нагрітої до температури T спіралі приходився на довжину хвилі 1,5 мкм у відповідності до відомого закону зсуву Віна

$$\lambda_m = \frac{2900}{T}. \quad (2.14)$$

і дає розрахункову температуру спіралі $T = 1930$ К. Оскільки при цьому глибина проникнення ІЧ випромінювання в молоко складає $\Delta = 1$ мм, то для забезпечення рівномірності нагрівання продукту у всьому обсязі режим руху об'єкта пастеризації повинен бути турбулентним, причому товщина в'язкого ламінарного підшару δ_e також повинна бути порядку 1 мм.

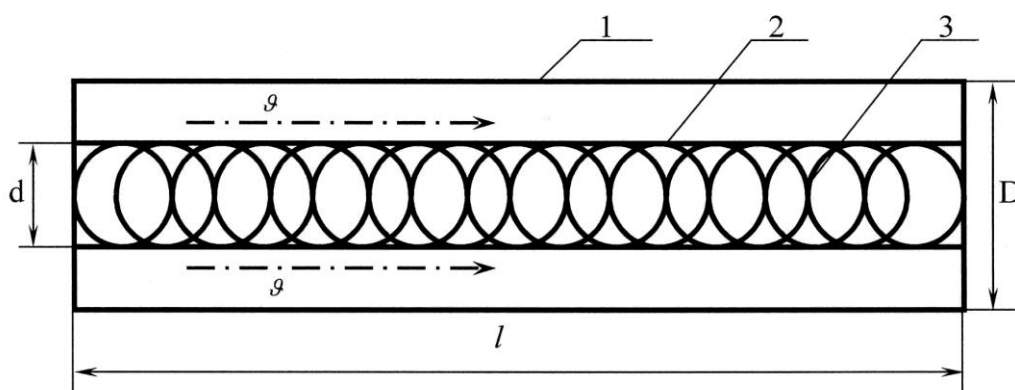


Рис. 2.4. Модель камери ІЧ пастеризації

1 – труба; 2 – кварцова оболонка з ІЧ випромінювачем; 3 – ніхромової спіраль

Такий режим забезпечується при виконанні умови

$$Re = \frac{v \cdot d_e}{\nu} \geq 2300, \quad (2.15)$$

де Re – число Рейнольдса;

d_e – еквівалентний діаметр об'єкта пастеризації, м;

v – швидкість руху об'єкта пастеризації, м/с;

ν – кінематичний коефіцієнт в'язкості об'єкта пастеризації, м²/с.

У кільцевому зазорі між трубами 1 і 2 величина d_e дорівнює

$$d_e = 4 \cdot R_r = 4 \cdot \frac{s}{\chi} = 4 \cdot \frac{\frac{\pi}{4} \cdot (D^2 - d^2)}{\pi \cdot (D + d)} = D - d, \quad (2.16)$$

R_r – гідравлічний радіус потоку, м.

Із заданими значеннями D і d та відомою залежністю ν від температури рідини з умови (2.15) визначається мінімальна швидкість плин, фактичне значення якої повинно відповідати умові

$$\delta_e \approx \Delta. \quad (2.17)$$

Величина δ_e визначається співвідношенням

$$\delta_e \approx \frac{30 \cdot d_e}{\text{Re} \cdot \sqrt{\xi}} = \frac{30 \cdot d_e}{\frac{\nu \cdot d_e}{\nu} \cdot \sqrt{\xi}} = \frac{30 \cdot \nu}{\nu \cdot \sqrt{\xi}}. \quad (2.18)$$

де ξ – число Дарсі (коефіцієнт гідравлічного тертя).

В умовах турбулентного режиму плин величина ξ з достатньою точністю обчислюється за формулою Альтшуля

$$\xi = 0,11 \cdot \left(\frac{R_E}{d_e} + \frac{68}{R_E} \right)^{0,25}, \quad (2.19)$$

R_E – величина еквівалентної шорсткості стінок каналу руху рідини, м.

Для гладких труб ця величина складає 0,1 мм та менше.

Розрахункове значення ν визначає об'ємні витрати рідини V

$$V = \nu \cdot s = \nu \cdot \frac{\pi}{4} \cdot (D^2 - d^2), \quad (2.20)$$

і, відповідно, продуктивність апарата

$$G = \rho \cdot V = \rho \cdot \nu \cdot \frac{\pi}{4} \cdot (D^2 - d^2), \quad (2.21)$$

де ρ – щільність рідини, кг/м³.

Величину G , в свою чергу, визначає необхідну потужність ІЧ нагріву

$$Q = c \cdot G \cdot \Delta t = c \cdot G \cdot (t_{\text{вих}} - t_{\text{вх}}), \quad (2.22)$$

де c – питома теплоємність рідини (об'єкта пастеризації), Дж/кг·К;

$t_{вих}, t_{вх}$ – температура рідини на виході і вході труби, °С.

Температуру на виході з труби будемо приймати рівною 78 ± 1 °С. За цієї температури забезпечується знищення найбільш небезпечної мікрофлори молока (зокрема, збудника туберкульозу) та не відбувається небажаних фізико-хімічних змін складу молока.

Температуру на вході будемо приймати в інтервалі 40...60°С. Маючи на увазі, що молоко надходить у зону ІЧ опромінення після проходження рекуперативного теплообмінника, в якому підігрівається вже пастеризованим продуктом, обчислені значення G і Q повинні бути прийнятні для умов пастеризації молока молокопереробних підприємствах України.

Далі необхідно перевірити можливість забезпечення розрахункової потужності ІЧ нагріву Q з прийнятими геометричними розмірами випромінювача. При цьому врахуємо, що з досить щільною навивкою нагрівальної спіралі випромінювач можна приблизно вважати абсолютно чорним тілом через багаторазове відображення та розсіювання випромінювання всередині випромінювача. Тоді у відповідності до закону Стефана-Больцмана, для Q можна вивести формулу

$$Q \approx \sigma \cdot (T^4 - T_0^4) \cdot S_H \approx \sigma \cdot T^4 \cdot S_u = \sigma \cdot T^4 \cdot \pi \cdot d \cdot L, \quad (2.23)$$

де $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8}$ Вт/(м²·К⁴) – стала Стефана-Больцмана;

T_0 – температура навколишнього середовища, К;

S_u – площа поверхні випромінювача, м².

За наявності істотної розбіжності між результатами розрахунку за формулами (2.22) і (2.23) варто ввести корекцію в раніше прийняті значення d і l .

За уточненим значенням Q можна вибрати раціональні значення параметрів нагрівальної спіралі – діаметра дроту d_c і числа витків N .

Електрична потужність P , що виділяється в спіралі

$$P = \frac{U^2}{R}, \quad (2.24)$$

де R – опір спіралі, Ом.

Величина R визначається за виразом

$$R = \rho_c \cdot \frac{L_c}{S_c}, \quad (2.25)$$

де ρ_c – питомий електричний опір матеріалу спіралі, Ом·м;

L_c – повна довжина дроту спіралі, м;

S_c – площа перетину дроту, м².

Величина L_c визначається за формулою

$$L_c = N \cdot \frac{1}{2} \cdot \pi \cdot (d + d_0), \quad (2.26)$$

а S_c визначається як

$$S_c = \frac{1}{4} \cdot \pi \cdot d \cdot c^2, \quad (2.27)$$

При цьому повинна виконуватись умова

$$N \prec \frac{L}{d_c}. \quad (2.28)$$

Величина ρ_c визначається за довідниковими табличними даними [6].

На закінчення розрахунку необхідно перевірити можливість досягнення рівномірності прогріву продукту та високого ККД нагріву. Втрати енергії в розглянутій системі визначаються, головним чином, тепловіддачею від зовнішньої труби, температуру якої можна приблизно прийняти рівною температурі рідини, що протікає всередині, у навколишнє середовище з температурою t_0 (щонайменше, зазначені втрати визначаються розсіюванням енергії на кінцях труби, однак з досить великою її довжиною це розсіювання в першому наближенні можна не враховувати).

Інтенсивність тепловіддачі в навколишнє середовище із зазначеними допущеннями можна обчислити за формулою

$$Q_T = \alpha \cdot \pi \cdot D \cdot L \cdot (t - t_0). \quad (2.29)$$

$$\bar{t} = \frac{1}{2} \cdot (t_{BX} + t_{BHX}). \quad (2.30)$$

Коефіцієнт тепловіддачі α в умовах вільної конвекції в повітряному середовищі можна обчислити по наближеній формулі [21]

$$\alpha \approx 1,33 \cdot \left(\frac{\Delta t}{l} \right)^{0,25}. \quad (2.31)$$

де $\Delta t = \bar{t} - t_0$, $l = D$ (характерний розмір поверхні тепловіддачі).

ККД нагріву при розглянутих умовах

$$\eta = \frac{Q - Q_T}{Q}. \quad (2.32)$$

Нерівномірність температурного поля в поперечному перерізі потоку пастеризованого продукту в умовах турбулентного режиму його плину повинна, в основному, визначатися перепадом температури Δt_B у в'язкому підшарі біля стінки зовнішньої труби (відповідну величину поблизу стінки оболонки випромінювача можна не враховувати, оскільки тут має місце підвищена температура продукту в порівнянні з його основною масою).

Величину Δt_B можна визначити з умови рівності питомих теплових потоків:

$$q = \frac{\lambda_T}{\delta_B} \cdot \Delta t_B = \alpha \Delta t.$$

де λ_T - коефіцієнт теплопровідності пастеризованої рідини, Вт/м·К.

З цих умов випливає:

$$\Delta t_B = \alpha \Delta t \frac{\delta_B}{\lambda_m}. \quad (2.33)$$

З урахуванням (2.18) з (2.33) одержимо:

$$\Delta t_B = \frac{\alpha \Delta t}{\lambda_m} \cdot \frac{30\nu}{\nu \sqrt{\xi}} \approx \frac{const}{\nu}. \quad (2.34)$$

Звідси випливає, що перепад температур у в'язкому підшарі повинен зменшуватися зі збільшенням швидкості руху об'єкта пастеризації обернено пропорційно цієї швидкості. З отриманим розрахунковим значенням v величина Δt_B не повинна перевищувати $1...2^\circ\text{C}$.

Розглянемо ілюстративний приклад здійснення заданої розрахункової процедури. За середній температурі продукту $\bar{t} = \frac{1}{2}(60 + 80) = 70^\circ\text{C}$ значення v складає $0,62 - 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$.

Прийmemo наступні значення геометричних параметрів системи:

$$D = 50 \text{ мм} = 5 \cdot 10^{-2} \text{ м}; d = 10 \text{ мм} = 1 \cdot 10^{-2} \text{ м}; d_0 = 7 \text{ мм} = 0,7 \cdot 10^{-2} \text{ м};$$

$$l = 50 \text{ мм}.$$

$$\text{Тоді } d_3 = 5 \text{ см} - 1 \text{ см} = 4 \text{ см} = 4 \cdot 10^{-2} \text{ м};$$

із умови (2.15) знаходимо мінімальну швидкість руху продукту:

$$X \geq 2300 \frac{v}{d_3} = 0,035 \text{ м/с}.$$

Для величини B , з формули (2.19) за $k_3 = 0,1 \text{ мм} = 10^{-4} \text{ м}$ знаходимо:

$$\xi = 0,1 \left(\frac{10^{-4}}{4 \cdot 10^{-2}} + \frac{68}{2300} \right)^{0,25} = 0,0465.$$

При цьому формула (2.18) згідно з умовою $\delta_B \approx \Delta \approx 1 \text{ мм} = 10^{-3} \text{ м}$ дає:

$$v \approx \frac{30v}{\Delta \sqrt{\xi}} = \frac{30 \cdot 0,62 \cdot 10^{-6}}{10^{-3} \sqrt{0,0465}} \approx 0,086 \text{ м/с}.$$

Масова витрата рідини, відповідно до формули (2.21), за $\rho \approx 1025 \text{ кг/м}^3$ складе

$$G = 1,025 \cdot 10^3 \cdot 0,086 \cdot 0,785(25 - 1) \cdot 10^{-4} \approx 0,166 \text{ кг/с} \approx 600 \text{ кг/год.} = 0,6 \text{ Т/год.}$$

Об'ємна продуктивність при цьому складе

$$V = \frac{G}{\rho} \approx 1,62 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3/\text{с} = 0,162 \text{ л/с} \approx 580 \text{ л/год.}$$

Ці значення цілком прийнятні в масштабах молочного комбінату. Необхідна потужність ІЧ нагріву для цих умов визначається з формули (2.22) при $C = 3800 \text{ Дж/(кг·K)}$ і $\Delta t = 80 - 60 = 20^\circ\text{C}$:

$$Q = 3.8 \cdot 10^3 \cdot 0.166 \cdot 20 = 12.6 \cdot 10^3 \text{ Вт} = 12.6 \text{ кВт}.$$

Помітимо, що питомі енерговитрати в даному випадку будуть дорівнювати

$$\frac{Q}{G} = \frac{12.6}{0.6} = 21 \text{ кВт} \cdot \text{год/т}.$$

що приблизно в 3 рази менше, ніж в існуючих пастеризаторах з конвективним теплообміном.

Перевіряємо розрахункове значення Q відповідно до формули (2.23):

$$Q = 5.67 \cdot 10^{-8} \cdot (1930)^4 \cdot 3.14 \cdot 1 \cdot 10^{-2} \cdot 0.5 \approx 1.235 \cdot 10^4 \text{ Вт} = 12.35 \text{ кВт}.$$

Розбіжність зі знайденими вище значеннями не перевищує 3%, тому прийняті параметри системи не мають потребу в корекції.

Прийmemo, далі, діаметр дроту нагрівальної спіралі рівним:

$$d_c = \frac{1}{2}(d - d_0) = 1.5 \text{ мм}.$$

Питомий опір ніхрому при $t = 1700^\circ\text{C}$ складає $\rho_c = 1.7 \cdot 10^6 \text{ Ом} \cdot \text{м}$ [21].

Прийmemo число витків рівним

$$N = 150 < \frac{0.5}{1.5 \cdot 10^{-3}} = 330.$$

тоді, відповідно до формули (2.26),

$$L_c = 150 \cdot \frac{1}{2} \cdot 3.14(1 + 0.7) \cdot 10^{-2} \approx 4.0 \text{ м}.$$

Тоді електричний опір спіралі буде дорівнювати

Величина S_c складе

$$S_c = \frac{\pi}{4} d_c^2 = 0.785 \cdot (1.5 \cdot 10^{-3})^2 = 1.765 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2.$$

$$R \approx 1.7 \cdot 10^{-6} \frac{4.0}{1.765 \cdot 10^{-6}} \approx 3.86 \text{ Ом}.$$

Потужність, що виділяється в спіралі, складе

$$P = \frac{220^2}{3.86} \approx 1.25 \cdot 10^4 \text{ Вт} = 12.5 \text{ кВт}$$

що відрізняється від знайденого вище значення Q менш чим на 1%. Таким чином, заданий режим ІЧ нагріву є технічно здійсненним.

Оцінимо тепер ККД нагрівання за допомогою формул (2.29)-(2.32). Для коефіцієнта тепловіддачі в навколишнє середовище (α) при

$$\Delta t = t - t_0 = \frac{1}{2} (60 + 80) - 20 = 50 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

(при температурі навколишнього повітря $t_0 = 20 \text{ } ^\circ\text{C}$) і $l = D = 5 \cdot 10^{-2} \text{ м}$ по формулі (2.31) знаходимо:

$$\alpha = 1.33 \left(\frac{50}{5 \cdot 10^{-2}} \right)^{0.25} \approx 7.5 \text{ Вт/м}^2\text{К}.$$

Величина Q_T складе, згідно (2.29),

$$Q_T \approx 7.5 \cdot 3.14 \cdot 5 \cdot 10^{-2} \cdot 0.5(70 - 20) = 30 \text{ Вт}.$$

Тоді ККД нагріву відповідно до (2.32) буде рівним

$$\eta = \frac{12600 - 30}{12600} \approx 0.997 \approx 99.7\%.$$

Фактичний ККД буде трохи нижче через наявність втрат енергії поблизу кінців труби. Відзначимо ще, що щільність теплового потоку від ІЧ випромінювача складе

$$\frac{Q}{\pi d L} = \frac{12600}{3.14 \cdot 1 \cdot 10^{-2} \cdot 0.5} \approx 8 \cdot 10^5 \text{ Вт/м}^2.$$

що набагато вище, ніж при традиційних способах передачі теплоти при пастеризації.

Нарешті, оцінимо перепад температури по перетині потоку об'єкта пастеризації за допомогою формули (2.34). При коефіцієнті теплопровідності молока $\lambda_m = 0,4 \text{ Вт/м}\cdot\text{К}$ і зазначених вище значеннях інших параметрів ця формула дає:

$$\Delta t_b \approx \frac{7.5 \cdot 50}{0.4} \cdot \frac{30 \cdot 0.62 \cdot 10^{-6}}{\nu \cdot \sqrt{0.0465}} \approx \frac{0.08}{\nu} = 0.93 \text{ K (при } \nu = 0.086 \text{ м/с)}.$$

Це значення є технологічно прийнятним; фактичне значення перепаду температури в перетині каналу може бути трохи великим через неминучу наявність різниці температур у турбулентному ядрі потоку об'єкта пастеризації. Тому дана оцінка має потребу в експериментальній перевірці.

Приведені співвідношення утворюють надійну теоретичну базу для проведення технологічних розрахунків, зокрема, з метою встановлення найбільш раціональних режимів запропонованого процесу ІЧ пастеризації.

Розглянемо можливість розміщення в трубі пастеризатора пучка ІЧ випромінювачів, що складається з n окремих елементів, аналогічних показаному на рис. 2.5; випромінювачі можна розмістити симетричним образом по перетині труби, наприклад, у шаховому порядку [23].

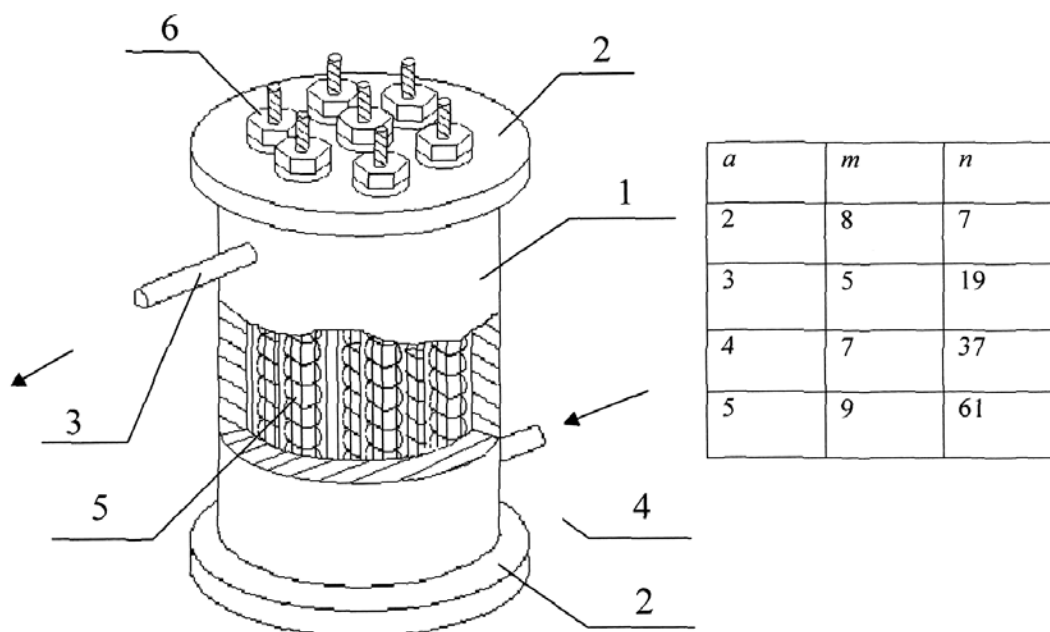


Рис. 2.5. Модель проточного ІЧ пастеризатора з таблицею можливих варіантів розташування нагрівачів:

1 – камера нагріву; 2 – фланці; 3, 4 – вихідний та вхідний патрубки відповідно; 5 – ІЧ нагрівач; 6 – гайка

На схемі (рис. 2.5) зображене розташування n випромінювачів у каналі до

центра об'єкта; m – число випромінювачів на великій діагоналі; a – число випромінювачів на малій діагоналі.

Розглянемо далі такі параметри: S – крок розташування випромінювачів; d_n – їхній зовнішній діаметр; d_e – внутрішній діаметр каналу.

Значення, що рекомендується, $S = (1,25 \dots 1,5) \cdot d_n$.

Приклад: $d_n = 10$ мм, $d_e = 45$ мм.

Тоді вибираємо крок $S = 1,5 \cdot d_n = 15$ мм, знаходимо

$$m = \frac{d_e}{S} = 3.$$

Число випромінювачів у потоці буде дорівнювати

$$n = \frac{3}{4}(3^2 - 1) + 1 = 7.$$

Такий конструктивний захід може мати мету збільшення рівномірності теплового потоку в перетині каналу руху об'єкта пастеризації. Поперечний переріз потоку об'єкта пастеризації при цьому визначається формулою

$$S = \frac{\pi D^2}{4} - n \frac{\pi d^2}{4} = \frac{\pi}{4} (D^2 - n d^2). \quad (2.35)$$

Наприклад, при $D = 5$ см, $d = 1$ см, $n = 5$ знаходимо:

$$S = 0.785(25 - 5 \cdot 1) \cdot 10^{-4} = 1.57 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2.$$

Еквівалентний діаметр потоку при цьому буде дорівнювати

$$d_{\text{э}} = 4R_r = 4 \frac{S}{X} = 4 \frac{\frac{\pi}{4} (D^2 - n d^2)}{\pi (D + n d)} = \frac{D^2 - n d^2}{D + n d}. \quad (2.36)$$

При зазначених вище значеннях величин

$$d_{\text{э}} = 2 \cdot 10^{-2} \text{ м.}$$

З умови (2.15) визначаємо мінімальну швидкість плинину:

$$v = 2300 \frac{v}{d_{\text{э}}} = 0.071 \text{ м/с.}$$

З формул (2.17) і (2.18) визначаємо раціональне значення швидкості

$$v = \frac{30\nu}{\delta_B \sqrt{\xi}} \approx 0.093 \text{ м/с.}$$

Продуктивність процесу складе

$$G = \rho v S = 0,15 \text{ кг/с} = 540 \text{ кг/год.}$$

Фізичне обґрунтування можливості введення в потік продукту пучка ІЧ випромінювачів замість одиночного випромінювача полягає в наступному. Опір блоку випромінювачів у кількості n паралельно з'єднаних спіралей з опором кожен R_1 буде дорівнювати

$$R = \frac{R_1}{n}. \quad (2.37)$$

Відповідно потужність випромінювання кожної нагрітої спіралі визначиться як

$$Q_1 = \frac{U^2}{R_1} = \frac{U^2}{nR} = \frac{1}{n} Q. \quad (2.38)$$

де Q – розрахункова потужність ІЧ опромінення продукту в цілому. Застосування такого з'єднання дозволяє уникнути використання ніхромового дроту великого діаметра для пропускання великих струмів

$$I = \frac{U}{R}. \quad (2.39)$$

Так при потужності нагріву $P = 12,6 \text{ кВт}$ і $U = 220 \text{ В}$ маємо

$$R = \frac{220^2}{12600} \approx 3.84 \text{ Ом}, I = \frac{220}{3.84} \approx 57,3 \text{ А.}$$

Використання пучка, наприклад, з 7 випромінювачів дозволяє знизити потужність кожного з них до

$$P_1 = \frac{12,6}{7} = 1.8 \text{ кВт}$$

і підвищити їхній опір до $R_1 = 7 \cdot 3.84 = 26.88 \text{ Ом}$, а силу струму зменшити до

$$I_1 = \frac{57.3}{7} = 8.19 \text{ А}$$

Такі струми можна пропускати через ніхромовий дріт діаметром 0,7...0,8 мм. З іншого боку, потужність випромінювання $Q \approx P$ визначає температуру випромінювача відповідно до згадуваного вище закону Стефана-Больцмана $Q = \sigma \cdot F \cdot T^4$ або

$$T = \left(\frac{Q}{\sigma F} \right)^{\frac{1}{4}}, \quad (2.40)$$

де F – площа поверхні випромінювача.

Якщо знизити потужність окремого випромінювача до $P_1 = (P/n)$, то його температура стане рівною

$$T = \left(\frac{Q}{\sigma F} \right)^{\frac{1}{4}} = \left(\frac{Q}{n \sigma F} \right)^{\frac{1}{4}} = \frac{T}{n^{\frac{1}{4}}}. \quad (2.41)$$

Наявність показника ступеня (1/4) робить зниження T_1 в порівнянні з T технологічно сприятливим ефектом. Наприклад:

$n = 3$	$n = 5$
$\frac{T}{T_1} = n^{\frac{1}{4}} = 3^{\frac{1}{4}} \approx 1.31$	$\frac{T}{T_1} \approx 1.5$

При цьому довжина хвилі, що відповідає максимуму ІЧ випромінювання, зміститься вбік великих значень.

Так, при $P = 10^4$ Вт, $F = \pi \cdot d$ та $l = 3.14 \cdot 10 \cdot 10^{-3} \cdot 0.5 = 1.57 \cdot 10^{-2} \text{ м}^2$, одержимо: $T = 1830 \text{ К}$, що відповідає $\lambda_M \approx 1,5 \text{ мкм}$; це значення λ_M несприятливе для обробки молока. Якщо ж ввести в потік $n = 5$ шт. випромінювачів, то їхня температура стане рівною $T_1 \approx \frac{T}{1.5} \approx 1220 \text{ К}$, при цьому $\lambda_M = 2,4 \text{ мкм}$, що ближче

відповідає технологічним вимогам. Таким чином, даний конструктивний захід дозволяє поліпшити рівномірність руху продукту по перетину каналу, власне кажучи, без погіршення основних характеристик процесу. При цьому варто враховувати неминуче ускладнення конструкції апарата і схеми електроживлення

ІЧ випромінювачів, тому поміщення в потік об'єкта пастеризації **н** інфрачервоних випромінювачів замість одного вимагає в кожному конкретному випадку спеціального обґрунтування.

2.3.2. Розрахунок параметрів теплообмінної камери

В ІЧ установці секція регенерації призначена для відбору теплової енергії пастеризованого молока сирым молоком і виконана на базі теплообмінника змієвикового типу. Площа поверхні теплообміну, повинна забезпечувати підігрів молока в секції регенерації до 52°C. При заданій продуктивності установки коефіцієнт регенерації повинен бути більше 0,8, оскільки при підвищенні цього коефіцієнта енергетичні витрати знижуються.

Вихідні дані для розрахунку:

Масова витрата продукту: $G = 300$ кг/год.

Температура теплоносія на вході в теплообмінник $t_n = 10^\circ\text{C}$.

Температура теплоносія на виході з теплообмінника $t_k = 50^\circ\text{C}$.

Теплоносій – молоко.

Тепловий розрахунок.

Теплове навантаження теплообмінника знаходимо із рівняння

$$Q = G \cdot c \cdot (t_k - t_n), \quad (2.42)$$

де G – масова витрата продукту, кг/год.;

c – питома теплоємність продукту, Дж/кг·К;

t_k – температура теплоносія на виході з теплообмінника, °C;

t_n – температура теплоносія на вході у теплообмінник, °C.

$$Q = 0,084 \cdot 3900 \cdot (50 - 10) = 13104 \text{ Вт.}$$

Коефіцієнт теплопередачі для чистої поверхні визначають як [8]

$$K = \frac{1}{1/\alpha_1 + \delta/\lambda + 1/\alpha_2} \quad (2.43)$$

де α_1 – коефіцієнт тепловіддачі гарячого теплоносія, Вт/(м² · К);

α_2 – коефіцієнт тепловіддачі холодного теплоносія, Вт/(м² · К);

δ – товщина стінки, м;

λ – коефіцієнт теплопровідності матеріалу стінки, Вт/(м · К).

Коефіцієнти α_1 та α_2 розраховують з числа Нуссельта

$$\alpha = \frac{Nu \cdot \lambda}{l} \quad (2.44)$$

де λ – коефіцієнт теплопровідності того теплоносія, для якого визначається коефіцієнт тепловіддачі, Вт/(м · К);

l – визначальний геометричний розмір, м.

Число Нуссельта знаходять із критеріальних рівнянь в залежності від конкретних умов теплообміну.

Для гарячого теплоносія число Нуссельта знаходимо з критеріального рівняння [8]:

$$Nu_1 = C \cdot (d_e \cdot Re)^{0.6} Pr^{0.33}, \quad (2.45)$$

де $C = 1,16$ – коефіцієнт відсутності сегментних перегородок;

d_e – еквівалентний діаметр міжтрубного простору, м;

Re – число Рейнольдса;

Pr – число Прандтля.

Еквівалентний діаметр визначають за формулою

$$d_e = d_3 + (3...4) \cdot d, \quad (2.46)$$

де d_3 – діаметр зміювика, м;

d – діаметр труби зміювика, м.

$d_e = 0,158 + 3 \cdot 0,014 = 0,2$ м.

Число Рейнольдса визначаємо за формулою

$$\text{Re} = \frac{W \cdot d \cdot \rho}{\mu} \quad (2.47)$$

де W – швидкість руху теплоносія, м/с;

ρ – густина теплоносія, кг/м³;

μ – коефіцієнт динамічної в'язкості, Па·с.

Число Рейнольдса для гарячого теплоносія:

$$\text{Re}_1 = \frac{0,4 \cdot 0,2 \cdot 1005}{0,58 \cdot 10^{-3}} = 138260$$

Число Нуссельта знаходимо за формулою (2.45)

$$\text{Nu}_1 = 0,16 \cdot (0,2 \cdot 138620)^{0,6} \cdot 4,2^{0,37} = 126.$$

Для холодного теплоносія число Нуссельта знаходимо з критеріального рівняння [8]:

$$\text{Nu}_2 = 0,023 \cdot \text{Re}^{0,8} \cdot \text{Pr}^{0,4} \quad (2.48)$$

Число Рейнольдса для холодного теплоносія знаходимо за (2.47):

$$\text{Re}_2 = \frac{0,4 \cdot 0,014}{0,625 \cdot 10^{-6}} = 8960.$$

Число Нуссельта знаходимо за формулою (2.48)

$$\text{Nu}_2 = 0,023 \cdot 8900^{0,8} \cdot 10,6^{0,4} = 85,38.$$

Коефіцієнт тепловіддачі гарячого теплоносія знаходимо за формулою (2.44), використовуючи відповідні дані

$$\alpha_1 = \frac{126 \cdot 0,53}{0,2} = 333 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К}.$$

Коефіцієнт тепловіддачі холодного теплоносія

$$\alpha_2 = \frac{85,38 \cdot 0,5}{0,014} = 3049 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К}.$$

Тоді коефіцієнт теплопередачі поверхні

$$K = \frac{1}{1/333 + 0,016/384 + 1/3049} = 286 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К}$$

Загальна площа теплообміну визначається за формулою

$$F = \frac{Q}{K\Delta t} \quad (2.49)$$

де Q – теплове навантаження теплообмінника, Вт;

K – коефіцієнт теплопередачі, Вт/(м² · К);

Δt – різниця температур теплоносія на вході та виході з теплообмінника.

$$F = \frac{13104}{296 \cdot 49} = 0,903 \text{ м}^2.$$

Довжину одного витка змійовика знаходимо за формулою

$$\ell = \pi d_3 \quad (2.50)$$

де d_3 – діаметр змійовика, м.

$$\ell = 3,14 \cdot 0,158 = 0,49 \text{ м.}$$

Загальна довжина змійовика визначається за формулою

$$L = \frac{F}{\pi d_p} \quad (2.51)$$

де F – загальна площа теплообміну, м²;

d_p – зовнішній діаметр труби змійовика, м.

$$L = \frac{0,903}{3,14 \cdot 0,016} = 18,06 \text{ м}$$

Загальне число витків змійовика визначається за формулою

$$n = \frac{L}{\ell} \quad (2.52)$$

$$n = \frac{18,06}{0,406} = 36 \text{ витків.}$$

Загальна висота змійовика визначається за формулою

$$H = n \cdot h, \quad (2.53)$$

де h – відстань між двома сусідніми витками змійовика.

Приймаємо конструктивно $h = 1,5$.

$$H = 36 \cdot (1,5 \cdot 0,016) = 0,873 \text{ м.}$$

Внутрішній діаметр корпусу апарата

$$D = d_3 + (3...4) \cdot d, \quad (2.54)$$

де d_3 – діаметр змійовика, м;

d – діаметр труби змійовика, м.

$$D = 0,158 + 3 \cdot 0,014 = 0,2 \text{ м.}$$

Гідравлічний розрахунок установки для ІЧ пастеризації молока.

Необхідна потужність насоса визначається за формулою

$$N = \frac{W \cdot \Delta p}{\eta} \quad (2.55)$$

де W – швидкість руху теплоносія, м/с;

Δp – перепад тиску у апараті, Па;

η – ККД насоса.

Перепад тиску у апараті визначається за формулою:

$$\Delta p = \Delta p_t + \Delta p_{mo} = \left(\lambda \frac{1}{d} + \sum \xi \right) \frac{w^2 \rho}{2}, \quad (2.56)$$

де Δp_t – втрати тиску на подолання опору тертя, Па;

Δp_{mo} – втрати тиску на подолання місцевих опорів, Па;

λ – коефіцієнт опору тертя;

l – довжина труби, м;

d – діаметр труби, м;

ξ – коефіцієнт місцевих опорів;

W – швидкість руху теплоносія, м/с;

ρ – густина теплоносія, кг/м³.

Втрати тиску на тертя у змійовику розраховують за емпіричною формулою

$$\Delta p_{\text{тз}} = \left(1 + 3,54 \frac{d}{d_3} \right) \cdot \Delta p_{\text{т}}, \quad (2.57)$$

де d_3 – діаметр змійовика, м;

Δp_m – втрати тиску на подолання опору тертя у прямій трубі, Па.

Загальна формула для розрахунку перепаду тиску у апараті матиме такий вигляд:

$$\Delta p = \left(1 + 3,54 \frac{d}{d_3} \right) \cdot \left(\lambda \frac{1}{d} + \sum \xi \right) \cdot \frac{w^2 \rho}{2}, \quad (2.58)$$

Коефіцієнт опору тертя визначається за формулою

$$\lambda = \frac{0,316}{\text{Re}^{0,25}}, \quad (2.59)$$

$$\lambda = \frac{0,316}{8960^{0,25}} = 0,032.$$

Перепад тиску у апараті

$$\begin{aligned} \Delta p &= \left(1 + 3,54 \cdot \frac{0,014}{0,158} \right) \cdot \left(0,032 \cdot \frac{1}{0,014} + 2,5 \right) \cdot \frac{0,4^2 \cdot 1025}{2} = \\ &= (1 + 0,31) \cdot (2,28 + 2,5) \cdot 82 = 5134 \text{ Па} \end{aligned}$$

Необхідна потужність насоса

$$N = \frac{0,4 \cdot 513,4}{0,9} = 228 \text{ Вт}.$$

Отже, проведений розрахунок параметрів запропонованого ІЧ пастеризатора при вказаних габаритних розмірах має наступні показники енергоспоживання:

Питомі енерговитрати – 21 кВт·год/т;

Споживана потужність – 12,6 кВт;

Струм споживання – 57,3 А.

2.4. Математична модель температурних режимів інфрачервоного пастеризатора молока

Як було зазначено, для отримання бактерицидного ефекту знайшов своє застосування спосіб пастеризації молока інфрачервоним випромінюванням. Для автоматизації процесу керування температурним режимом ІЧ пастеризатора, що працює в проточному режимі, необхідно отримати математичний опис – динамічну модель проточного апарата з підведенням енергії ІЧ-випромінюванням.

Для розробки математичної моделі ІЧ-пастеризатора і отримання аналітичних рівнянь, які характеризують динамічні властивості процесу нагріву і пастеризатора як об'єкту керування скористаємося матеріалами досліджень [10].

Розрахункова модель установки для теплової обробки молока ІЧ-випромінюванням являє собою об'єкт з чотирма теплоінерційними ємностями:

- 1) тіло розжарювання (ніхромові спіраль);
- 2) трубка з кварцового скла (в якій розміщена ніхромові спіраль);
- 3) об'єм, що зайнятий молоком, яке рухається між трубками у корпусі;
- 4) сам корпус з тепловою ізоляцією.

Математичний опис динамічних режимів такої установки (процесу, що відбувається) складемо на основі рівнянь теплового балансу виходячи з таких теплофізичних посилянь: потужність, що виділяється у тілі розжарювання, витрачається на збільшення його температури і частково передається шляхом конвективного теплообміну та випромінюванням до внутрішньої поверхні трубки, а також випромінюванням до молока, яке рухається у міжтрубному просторі. Теплота, сприйнята поверхнею (тілом) трубки, витрачається на нагрів самої трубки і від неї передається до молока конвективним теплообміном. Теплота, яка сприйнята молоком від випромінювача і трубки, витрачається на підвищення температури молока через зовнішню поверхню передається у навколишнє середовище і втрачається з молоком відведеним з апарата.

В основу рівнянь динаміки процесу покладено такі припущення:

- температура тіла розжарювання і трубки, де вона розміщена, за довжиною не змінюється, а їх нагрів безградієнтний;
- тепловими втратами повітря, через стінку корпусу у зовнішнє середовище, нехтуємо (за наявності теплоізоляції);
- поверхня трубки приймається для середнього діаметру;
- теплофізичні властивості молока, теплоємності матеріалів випромінювача та коефіцієнти теплопередачі в часі не змінюються і дорівнюють середнім за процес;
- температура випромінювача, апарата та молока у попередньому перетині однакові.

Для обраної фізичної моделі процесу з урахуванням наведених припущень складаємо наступні диференціальні рівняння:

- рівняння збереження енергії для тіла розжарювання:

$$P = m_w c_w \frac{\partial \theta_w}{\partial \tau} + c_{\text{пр}1} F_1 (T_w^4 - T_{\text{mp}}^4) + \alpha_{k1} F_{\text{mp}} (\theta_w - \theta_{\text{mp}}) + c_{\text{пр}2} F_2 (T_w^4 - T_m^4); \quad (2.60)$$

- рівняння збереження енергії для трубки:

$$A_{\text{mp}} c_{\text{пр}1} F_1 (T_w^4 - T_{\text{mp}}^4) + \alpha_{k1} F_{\text{mp}} (\theta_w - \theta_{\text{mp}}) = m_{\text{mp}} c_{\text{mp}} \frac{\partial \theta_{\text{mp}}}{\partial \tau} + \alpha_{k2} F_{\text{mp}} (\theta_{\text{mp}} - \theta_m); \quad (2.61)$$

- рівняння збереження енергії для молока:

$$A_m c_{\text{пр}2} F_1 (T_w^4 - T_m^4) + \alpha_{k2} F_{\text{mp}} (\theta_{\text{mp}} - \theta_m) = m_m c_m \frac{\partial \theta_m}{\partial \tau} + G H c_m \frac{\partial \theta_m}{\partial x}; \quad (2.62)$$

де $c_{\text{пр}}$ – приведені коефіцієнти випромінювання;

A_{mp}, A_m – коефіцієнти поглинання ІЧ – випромінювання склянкою трубкою та молоком;

α_{k1}, α_{k2} – коефіцієнти теплообміну повітря з трубкою і трубки з молоком, Вт/(м²·°C);

F_1, F_2 – поверхня випромінювання та трубки, м²;

T – абсолютна температура, °K:

$$T = (\theta + 273/100);$$

m_w, m_{mp}, m_m – маса тіла розжарювання, трубки і молока в об'ємі апарата, кг;

G – витрати молока, кг/с;

H – висота апарату, м;

c_w, c_{mp}, c_m – питома теплоємність матеріалів спіралі, трубки і молока, Дж/(кг·°C);

τ – час, сек.;

x – координата напрямку руху, м.

Отримана система нелінійних диференціальних рівнянь (2.60) – (2.62) описує динамічні характеристики процесу теплової обробки молока ІЧ-випромінюванням при таких початкових умовах:

$$\tau = 0; \quad \theta_w = \theta_{w0}; \quad \theta_m = \theta_{m0};$$

$$\frac{d\theta_w}{d\tau} = \frac{d\theta_{mp}}{d\tau} = \frac{d\theta_m}{d\tau} = 0$$

Оскільки дана система рівнянь аналітичного розв'язку не має, введемо додаткові спрощення, лінеаризуючи математичний опис.

1. Використаємо поняття лінійного коефіцієнта теплообміну випромінюванням і зробимо заміну:

$$c_{пр} F_1 (T_1^4 - T_2^4) = \alpha_l F (\theta_1 - \theta_2); \quad (2.63)$$

де α_l – лінійний коефіцієнт теплообміну випромінюванням, Вт/(м²·°C);

$$\alpha_l = 5.67 c_{пр} (T_1^2 + T_2^2) (T_1 + T_2).$$

У цьому випадку інтенсивність теплообміну можна представити як сумарну: конвективну і радіаційну:

$$q = \alpha_k(\theta_1 - \theta_2) + \alpha_l(\theta_1 - \theta_2) = (\alpha_k + \alpha_l)(\theta_1 - \theta_2) = \alpha_{kl}(\theta_1 - \theta_2). \quad (2.64)$$

2. Оскільки довжина випромінювачів незначна (до 0,6м), а потоки молока інтенсивно їх омивають, можна вважати, що відстань, яку проходить молоко дорівнює відстані від входу до виходу, тобто H ; тоді можна градієнт температури представити у кінцевих значеннях за формулою:

$$\frac{d\theta}{dx} = \frac{\Delta\theta}{\Delta x} = \frac{\theta_2 - \theta_1}{H}. \quad (2.65)$$

Використовуючи значення параметрів (2.63) і (2.64) в рівняннях (2.60) – (2.62), отримаємо лінійну систему рівнянь, що описує процес теплової обробки:

$$m_w c_w \frac{d\theta_w}{d\tau} = P_H + \alpha_{кл} F_{mp} \theta_{mp} + 0.5 \alpha_l F_1 \bar{\theta}_m - \theta_w (\alpha_{кл} F_{mp} + \alpha_l F_1) \quad (2.66)$$

$$m_{mp} c_{mp} \frac{d\theta_{mp}}{d\tau} = \theta_w (A_1 \alpha_{кл} F_1 + \alpha_{к1} F_{mp}) - \theta_{mp} (\alpha_{к1} F_{mp} + \alpha_{к2} F_{mp}) - \alpha_{к2} F_2 \bar{\theta}_m \quad (2.67)$$

$$m_m c_m \frac{d\theta_{m2}}{d\tau} = G_m c_m (\theta_{m1} - \theta_{m2}) + \alpha_{к2} F_2 (\theta_{mp} - \bar{\theta}_m) + A_m \alpha_l F_1 (\theta_w - \theta_m); \quad (2.68)$$

де θ_{m1} , θ_{m2} – температура молока на вході і виході;

$$\bar{\theta}_m = 0.5(\theta_{m1} + \theta_{m2}).$$

Зобразимо математичний опис динаміки теплової обробки молока ІЧ-випроміненням за допомогою передатних функцій.

У рівняннях (2.66) – (2.68) незмінними параметрами є такі:

- маса і поверхня матеріалів та середовищ $m_w c_w$, $m_{mp} c_{mp}$, $m_m c_m$;
- поверхні теплообміну F_1 , F_2 , F_{mp} ;
- коефіцієнти теплообміну α_1 , α_2 , α_l ;

Параметрами, що змінюються, є такі:

- температура випромінювача θ_w ;
- температура трубки θ_{mp} ;
- температура молока θ_{m1}, θ_{m2} ;
- продуктивність пастеризатора (витрати молока) G .

Виразимо змінні параметри об'єкта у приростах:

$\theta_w = \theta_{w0} + \Delta\theta_w;$	$\theta_{mp} = \theta_{mp0} + \Delta\theta_{mp};$
$\theta_{m1} = \theta_{m10} + \Delta\theta_{m1};$	$\theta_{m2} = \theta_{m20} + \Delta\theta_{m2};$
$G = G_0 + \Delta G.$	

Підставляючи значення змінних параметрів у рівняння (2.65) – (2.68), після множення, нехтуючи складовими малого ступеня і віднімання рівнянь статички, отримаємо наступні рівняння:

$$m_w c_w \frac{d\Delta\theta_w}{d\tau} + \Delta\theta_w = k_1 \Delta P + k_2 \Delta\theta_{mp} + k_3 \Delta\theta_{m1} + k_4 \Delta\theta_{m2} \quad (2.69)$$

$$m_{mp} c_{mp} \frac{d\Delta\theta_{m2}}{d\tau} + \Delta\theta_{m2} = k_5 \Delta\theta_w + k_6 \Delta\theta_{m1} + k_7 \Delta\theta_{m2} \quad (2.70)$$

$$m_m c_m \frac{d\Delta\theta_{m2}}{d\tau} + \Delta\theta_{m2} = k_8 \Delta\theta_{m1} + k_9 \Delta\theta_{mp} + k_{10} \Delta\theta_w \quad (2.71)$$

У рівняннях (2.69) – (2.71) прийняті наступні позначення:

$T_1 = \frac{m_w c_w}{k_{01}} ;$	$k_{01} = k_{кл} F_{mp} + \alpha_{л} F_1;$
$T_2 = \frac{m_{mp} c_{mp}}{k_{02}} ;$	$k_{02} = F_{mp} (\alpha_{k1} + \alpha_{k1});$
$T_3 = \frac{m_m c_m}{k_{03}} ;$	$k_{03} = G_m c_m + 0.5 k_2 F_2 + 0.5 \alpha_{л} F_1 A_m;$
$k_1 = k_{01}^{-1};$	$k_2 = \frac{k_{кл} F_{mp}}{k_{01}};$

$k_3 = \frac{\alpha_{\text{кл}}\alpha_{\text{л}}F_1}{k_{01}};$	$k_4 = k_3;$
$k_5 = \frac{A_1\alpha_{\text{кл}}F_1 + \alpha_{\text{к1}}F_{\text{мп}}}{k_{02}};$	$k_6 = k_7 = \frac{0.5\alpha_{\text{к2}}F_2}{k_{02}};$
$k_8 = \frac{G_{\text{м}}c_{\text{м}} - 0.5k_2F_2 - A_{\text{м}}\alpha_{\text{л}}F_1}{k_{03}};$	
$k_9 = \frac{\alpha_{\text{к2}}F_2}{k_{03}};$	$k_{10} = \frac{\alpha_{\text{л}}F_1}{k_{03}};$
$k_{11} = \frac{c_{\text{м}}(\theta_{\text{м1}} - \theta_{\text{м2}})}{k_{03}}.$	

Застосовуючи до рівняння (2.68) – (2.69) перетворення Лапласа при нульових початкових умовах, отримаємо систему рівнянь в операторній формі:

$$\begin{aligned} (T_1p + 1)\Delta\theta_w(p) = \\ = k_1\Delta P(p) + k_2\Delta\theta_{\text{мп}}(p) + k_3\Delta\theta_{\text{м1}}(p) + k_4\Delta\theta_{\text{м2}}(p) \end{aligned} \quad (2.72)$$

$$(T_2p + 1)\Delta\theta_{\text{мп}}(p) = k_5\Delta\theta_w(p) + k_6\Delta\theta_{\text{м1}}(p) + k_7\Delta\theta_{\text{м2}}(p) \quad (2.73)$$

$$\begin{aligned} (T_3p + 1)\Delta\theta_{\text{м2}}(p) = \\ = k_8\Delta\theta_{\text{м1}}(p) + k_9\Delta\theta_{\text{мп}}(p) + k_{10}\Delta\theta_w(p) + k_{11}\Delta G(p) \end{aligned} \quad (2.74)$$

$$(T_1p + 1)\Delta\theta_w(P) = k_1\Delta P(P) + k_2\Delta\theta_{\text{TP}}(P) + k_3\Delta\theta_{\text{м1}}(P) + k_4\Delta\theta_{\text{м2}}(P)$$

З отриманих рівнянь (2.72) – (2.74) визначаємо передатні функції по каналах керування ($\Delta\theta_{\text{м2}} - \Delta P$, $\Delta\theta_{\text{м2}} - \Delta G$, а також за збуренням ($\Delta\theta_{\text{м1}}$).

$W_1(p) = \frac{\Delta\theta_w(p)}{\Delta P(p)} = \frac{k_1}{T_1p + 1};$	$W_2(p) = \frac{\Delta\theta_w(p)}{\Delta\theta_{\text{мп}}(p)} = \frac{k_2}{T_1p + 1};$
$W_3(p) = \frac{\Delta\theta_w(p)}{\Delta\theta_{\text{м1}}(p)} = \frac{k_3}{T_1p + 1};$	$W_4(p) = \frac{\Delta\theta_w(p)}{\Delta\theta_{\text{м2}}(p)} = \frac{k_4}{T_1p + 1};$

$W_5(p) = \frac{\Delta\theta_{mp}(p)}{\Delta\theta_w(p)} = \frac{k_5}{T_2p + 1};$	$W_6(p) = \frac{\Delta\theta_{mp}(p)}{\Delta\theta_{m1}(p)} = \frac{k_6}{T_2p + 1};$
$W_7(p) = \frac{\Delta\theta_{mp}(p)}{\Delta\theta_{m2}(p)} = \frac{k_7}{T_2p + 1};$	$W_8(p) = \frac{\Delta\theta_{m2}(p)}{\Delta\theta_{m1}(p)} = \frac{k_8}{T_3p + 1};$
$W_9(p) = \frac{\Delta\theta_{m2}(p)}{\Delta\theta_{mp}(p)} = \frac{k_9}{T_3p + 1};$	$W_{10}(p) = \frac{\Delta\theta_{m2}(p)}{\Delta\theta_w(p)} = \frac{k_{10}}{T_3p + 1};$
$W_{11}(p) = \frac{\Delta\theta_{m2}(p)}{\Delta G(p)} = \frac{k_{11}}{T_3p + 1}.$	

На основі рівнянь (2.69) – (2.71) та визначених передатних функцій отримаємо лінійну математичну модель динаміки пастеризації молока ІЧ-опроміненням у вигляді структурної схеми (рис. 2.6).

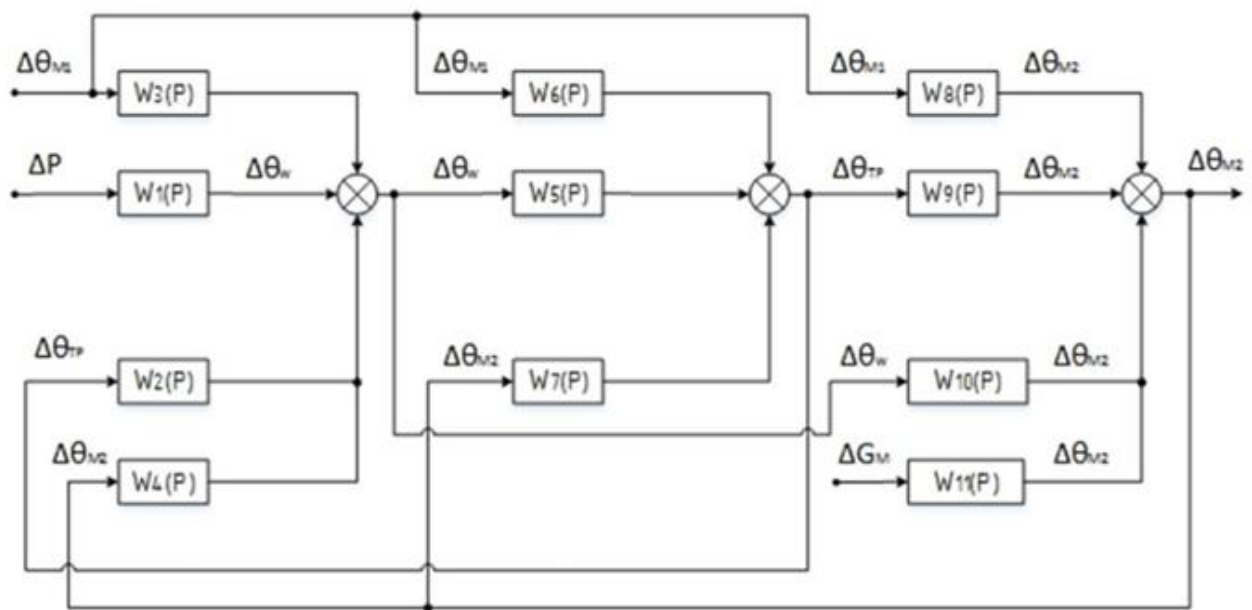


Рис. 2.6. Структурна схема лінійної моделі динаміки процесу пастеризації молока ІЧ-опроміненням

Розв’язок системи рівнянь (2.66) – (2.68) в середовищі Mathcad показано на рис. 2.7 у вигляді кривої розігріву ніхромової спіралі у колбі, тобто ІЧ-випромінювача, і нагрівання (пастеризації) молока у проточному режимі.

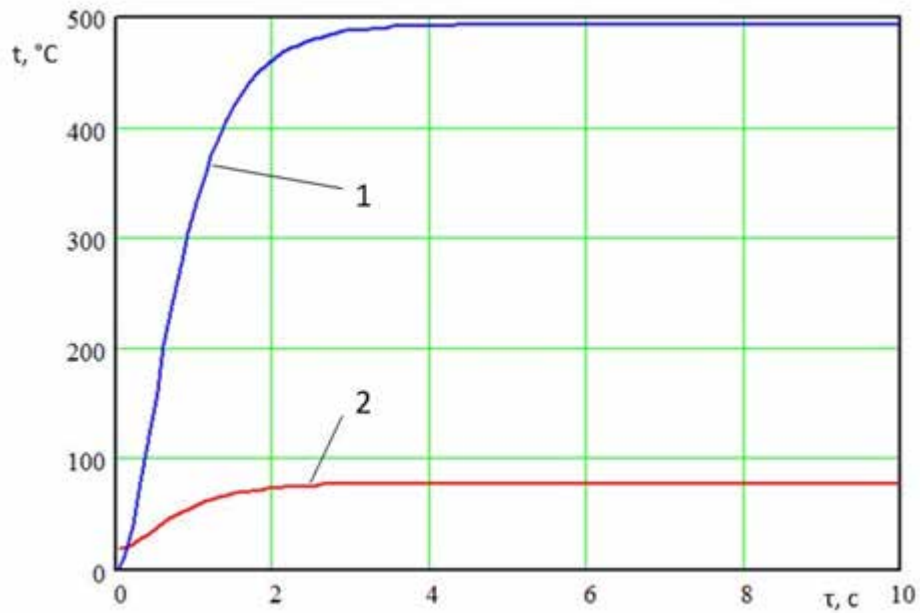


Рис. 2.7. Динаміка зміни температури ІЧ випромінювача із ніхромової спіралі (1) та молока, що пастеризується (2)

Для визначення передатної функції ІЧ пастеризатора для каналу керування температурою пастеризації молока був використаний графічний метод [2]. Для цього розгінна характеристика (рис. 2.7), була пронормована за виразом:

$$h(t_i) = \frac{\theta_B(t_i) - \theta_B(0)}{\theta_B(t_{max}) - \theta_B(0)} = \frac{\theta_B(t_i) - 18}{82 - 18} \quad (2.75)$$

де $\theta_B(t_i)$ – проміжне значення параметра в i -й момент часу t_i ; $\theta_B(0)$ – початкове значення параметра; $\theta_B(t_{max})$ – кінцеве значення параметра в усталеному режимі; $h(t_i)$ – значення нормованої кривої розгону в i -й момент часу.

Коефіцієнт передачі об'єкта розраховується як відношення різниці температури молока на виході ІЧ пастеризатора і температури молока, що подається на пастеризацію, Δt (керований параметр) до електричної потужності, що витрачається на нагрівання теплоносія $\Delta P_{IЧ}$ (параметр керування).

$$k_{ок} = \frac{t_{паст} - t_0}{\Delta P_{IЧ}} = \frac{82 - 18}{12,6} = 5,08 \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{кВт}}. \quad (2.76)$$

Чисельне значення постійної часу T_{ov} та часу запізнення τ_{ov} об'єкта знаходимо за допомогою дотичної, яку проводимо до точки перегину розгінної характеристики (рис. 2.7). Точка перегину відповідає середині відрізка часу, на якому спостерігається максимальний приріст ординати кривої розгону.

Передавна функція ІЧ пастеризатора для каналу керування температурним режимом пастеризації молока має вигляд

$$W_{ок}(p) = \frac{5,08 \cdot e^{-0,2p}}{1,2 \cdot p + 1}. \quad (2.77)$$

РОЗДІЛ 3

ВИБІР РЕГУЛЯТОРА ТА ОБГРУНТУВАННЯ ПАРАМЕТРІВ ЙОГО НАЛАШТУВАНЬ

3.1. Вибір алгоритму керування

Для визначення алгоритму керування визначимо динамічні властивості об'єкта та показники якості, які повинні бути забезпечені по технологічним вимогам. Регулятор обирають за величиною відношення часу запізнення до постійної часу об'єкта керування:

$0,2 \leq \tau/T \leq 1$ лінійний алгоритм керування;

$\tau/T > 1$ імпульсний алгоритм керування;

$\tau/T < 0,2$ позиційний алгоритм керування.

$$\tau/T = 0.2/1.2 = 0.16 \quad (3.1)$$

За розрахунками підходить лінійний алгоритм керування.

Динамічні властивості об'єкта управління відіграють вирішальну роль при виборі найбільш ефективного закону керування. Встановлено, що критерієм для правильного вибору закону керування може служити значення відношення часу

чистого запізнення об'єкта до його постійної часу, тобто $\frac{\tau_{oy}}{T_{oy}}$. Для цього передаточна функція для статичного об'єкта повинна бути представлена у вигляді рівняння. В (табл. 3.1) наведені рекомендації по вибору закону керування та типу регулятора виходячи з величини відношення часу запізнювання τ_{oy} до постійної часу об'єкта T_{oy} :

- при $\frac{\tau_{oy}}{T_{oy}} < 0,2$ можна вибирати позиційний, неперервний або цифровий регулятор;

- при $\frac{\tau_{oy}}{T_{oy}} > 1$ необхідно вибирати спеціальний цифровий (імпульсний) регулятор із випередженням, який компенсує запізнювання в контурі керування;

- при $0,2 \leq \frac{\tau_{oy}}{T_{oy}} \leq 1$ зазвичай вибирають неперервний або цифровий регулятор, що реалізує П-, ПІ-, ПД-, ПІД-закон керування.

Крім того, для обґрунтування закону керування і вибору регулятора, який відповідає цьому закону, необхідно знати не тільки властивості об'єкта та вимоги до технологічного процесу, але й деякі конструктивні особливості самих регуляторів. Промислові регулятори реалізують закон регулювання з певною похибкою, що обов'язково повинно враховуватись при виборі усіх технічних засобів, що входять до складу системи автоматичного керування.

В даному випадку передаточна функція об'єкта, для нього відношення $\frac{\tau_{oy}}{T_{oy}}$.

Таблиця 3.1 – Вибір закону керування і типу регулятора за відношенням $\frac{\tau_{oy}}{T_{oy}}$

Співвідношення $\frac{\tau_{oy}}{T_{oy}}$	Характеристика об'єкта		Закон керування та тип регулятора
$0 \leq \frac{\tau_{oy}}{T_{oy}} \leq 0,05$	Із малим запізненням	Дуже добре керований	- позиційний; - неперервний П-, ПІ-, ПД-, ПІД-регулятор
$0,05 \leq \frac{\tau_{oy}}{T_{oy}} \leq 0,1$	Із значною інерційністю та з малим запізненням	Дуже добре керований	- позиційний; - неперервний П-, ПІ-, ПД-, ПІД-регулятор
$0,1 \leq \frac{\tau_{oy}}{T_{oy}} \leq 0,2$	Із суттєвим транспортним запізненням	Добре керований	- позиційний; - неперервний П-, ПІ-, ПД-, ПІД-регулятор
$0,2 \leq \frac{\tau_{oy}}{T_{oy}} \leq 0,4$	Із суттєвим транспортним запізненням	Керований	- неперервний або цифровий ПІ-, ПД-, ПІД-регулятор
$0,4 \leq \frac{\tau_{oy}}{T_{oy}} \leq 0,8$	Із значним транспортним запізненням	Важко керований	- неперервний або цифровий ПІ-, ПД-, ПІД-регулятор
$0,8 \leq \frac{\tau_{oy}}{T_{oy}} \leq 1,0$	З великим транспортним запізненням	Дуже важко керований	- неперервний або цифровий ПІ-, ПД-, ПІД-регулятор

За умовами таблиці 3.1 об'єкт управління відноситься до добре керованого, для якого можна застосувати неперервний ПІ-регулятор.

3.2. Реалізація алгоритму керування

3.2.1. Вибір пристроїв керування

Для керування обрано контролер на базі лінійки апаратного забезпечення Arduino. За технічними характеристиками обрано модель Arduino Uno.

Arduino Uno — це широко використовувана плата мікроконтролерів з відкритим кодом на базі мікроконтролера ATmega328P. У його склад входить все необхідне для зручної роботи з мікроконтролером: 14 цифрових входів / виходів (з них 6 можуть використовуватися в якості ШІМ-виходів), 6 аналогових входів, кварцовий резонатор на 16 МГц, роз'єм USB, роз'єм живлення, роз'єм для програмування всередині схеми (ICSP) і кнопка скидання. Для початку роботи з пристроєм досить просто подати живлення від AC/DC-адаптера або батарейки, або підключити його до комп'ютера за допомогою USB-кабелю.

На відміну від всіх попередніх плат Ардуіно, Uno в якості перетворювача інтерфейсів USB-UART використовує мікроконтролер ATmega16U2 (ATmega8U2 до версії R2) замість мікросхеми FTDI.

На платі Arduino Uno версії R2 для спрощення процесу оновлення прошивки доданий резистор, що підтягує до землі лінію HWB мікроконтролера 8U2.

Таблиця 3.2

Характеристики контролера

Основні критерії	Значення
Мікроконтролер	ATmega328
Напруга живлення	7-12В
Основні критерії (рекомендований)	Значення
Напруга живлення (граничне)	6-20В
Аналогові входи	6
Робоча напруга	5В
Максимальний вихідний струм виводу 3.3V	50мА
Максимальний струм одного виведення	40мА
Flash-пам'ять	32 КБ(ATmega328) з яких 0.5КБ використовуються завантажувачем
SRAM	2 КБ (ATmega328)
Тактова частота	16МГц
Цифрові входи / виходи	14 (з них 6 можуть використовуватися в якості ШІМ-виходів)
EEPROM	1 КБ (ATmega328)

Arduino Uno може житися від USB або від зовнішнього джерела живлення — тип джерела вибирається автоматично.

В якості зовнішнього джерела живлення (НЕ USB) може використовуватися мережевий AC/DC-адаптер або акумулятор/батарея. Штекер адаптера (діаметр — 2.1 мм, центральний контакт — позитивний) необхідно вставити у відповідний роз'єм живлення на платі. У разі живлення від акумулятора / батареї, її проводу необхідно під'єднати до висновків Gnd і Vin роз'єму POWER.

3.2.2. Обґрунтування вибору давача температури

Оскільки створюється цифрова система керування, було б доцільно використовувати такі технічні засоби автоматизації, що призначені для використання разом з мікроконтролерами. Такі сучасні ТЗА характеризуються високою точністю та надійністю.

При виборі датчиків як правило, ставлять наступні вимоги:

- лінійність і однозначність статичної характеристики (допустима нелінійність не повинна перевищувати 0,1...3,0 %);
- високу чутливість;
- стабільність характеристик у часі;
- швидкодія;
- стійкість до хімічних впливів контрольованого та навколишнього середовища (первинні перетворювачі, розміщені у захисній оболонці);
- мінімальний зворотній вплив на контролюючий параметр; зручність монтажу і обслуговування.

Вимірювальні перетворювачі вибирають, як правило, в два етапи: на першому етапі за типом контрольованого параметра; на другому етапі за каталогами знаходять його типорозмір.

Датчик рекомендується підбирати таким чином, щоб межі його вимірювання охоплювали діапазон зміни контрольованої ним величини X і були як найближчими до них, не забуваючи про необхідність забезпечення

необхідної перевантажувальної здатності датчика і про можливість його підключення до обраного електронного пристрою. При цьому особливу увагу необхідно приділяти швидкодії, або інерційності вимірювального перетворювача, яка характеризується його постійною часу $T_{\text{вп}}$.

Максимальне значення температури в пастеризаторі складає 95°C , робоче значення – $79,5 \pm 0,5^{\circ}\text{C}$. Для цих значень температури можна вибрати межі вимірювання цифрового датчика температури **DS 1821 (Dallas Semiconductor)** (рисунок 3.3), які складають $-55...+125^{\circ}\text{C}$. Інерційність цього перетворювача складає 5 с.

Для того, щоб цей перетворювач у процесі вимірювання температури в пастеризаторі на заданому рівні не вносив недопустиму динамічну похибку вимірювання температури, його постійна часу $T_{\text{вп}}$ повинна бути на порядок меншою від постійної часу об'єкта $T_{\text{оу}}$. При цьому можна знехтувати інерційністю датчика і наближено вважати його без інерційним.

Постійна часу пастеризаторі $T_{\text{оу}}$ складає 1.2 с. З огляду на сказане вище, максимальна постійна часу вимірювального перетворювача, при якій можна знехтувати його інерційністю, повинна бути не більше $T_{\text{оу}}$. А постійна часу вибраного датчика температури DS 1821 дорівнює 1 с.

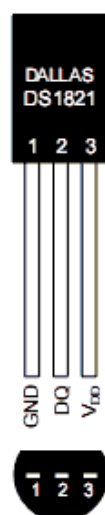


Рис. 3.3. Зовнішній вигляд датчика температури DS1821

Передатна функція для цього датчика є інерційною ланкою першого порядку:

$$W_{CE}(s) = \frac{1}{1 \cdot s + 1}. \quad (3.2)$$

В якості виконавчого механізму використовується ІЧ нагрівач, передаточна функція якого є інерційною ланкою [14]

$$W_{BM} = \frac{K_{BM}}{T_{BM} \cdot s + 1} = \frac{0.07}{0.2 \cdot s + 1}. \quad (3.3)$$

РОЗДІЛ 4

РОЗРОБКА ЦИФРОВОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ

Цифрові системи керування (ЦСК) – це системи, в яких безперервні сигнали перетворюються в цифрові коди і керування здійснюється з використанням алгоритмів обробки цифрової інформації.

Цифрові системи керування передбачають перетворення безперервних сигналів у цифрові коди та зворотне перетворення цифрових кодів у безперервні сигнали. Такі перетворення здійснюють аналогово-цифрові (АЦП) і цифро-аналогові (ЦАП) перетворювачі. У таких перетворювачах здійснюється квантування як за часом так і за рівнем.

Дискретизація (квантування) – заміна неперервного сигналу тими чи іншими дискретними значеннями.

Види дискретизації:

- за часом
- за рівнем
- одночасна дискретизація за рівнем і за часом

Задача вибору раціонального періоду квантування T_k є однією з основних проблем реалізації ЦСК. При зменшенні часу керування точність керування цифровою системою збільшується, але при цьому зростає навантаження мікроЕОМ. При збільшенні часу квантування втрачається важлива інформація про сигнал, що може призвести до неможливості відтворення вихідного сигналу за дискретними вибірками. Тому виникає проблема пошуку раціонального часу квантування T_k , який задовольнив би такі суперечливі вимоги.

Згідно з теоремою Котельникова для можливості безпомилкового відтворення сигналу, як показує аналіз амплітудних спектрів імпульсної системи, найменша частота квантування повинна дорівнювати $2\omega_c$, де ω_c –

найвища частота вихідного сигналу, яка має місце в амплітудно-частотній характеристиці неперервної частини системи.

Теорема стверджує: якщо сигнал не містить в собі частот вище, ніж ω_c рад/с, він повністю описується своїми значеннями, виміряними у дискретні моменти часу за інтервалом $T_k = \pi / \omega_c$.

Визначення передаточної функції неперервної частини розімкнутої системи:

$$W_{\text{роз.}}^{\text{н.ч.}}(s) = \frac{K_\theta}{T_\theta s + 1} \frac{K_o}{T_o s + 1} \frac{K_\theta K_o}{T_\theta T_o s^2 (T_\theta + T_o) s + 1}. \quad (4.1)$$

Визначимо передаточну функцію неперервної частини замкненої системи:

$$W_{\text{зам.}}^{\text{н.ч.}} = \frac{W_{\text{роз.}}^{\text{н.ч.}}(s)}{1 + W_{\text{роз.}}^{\text{н.ч.}}(s)} = \frac{K_\theta K_o}{(T_\theta T_o s^2 + (T_\theta T_o) s + 1) + K_\theta K_o}. \quad (4.2)$$

Визначення амплітудно-частотної характеристики неперервної частини замкненої системи:

$$W_{\text{зам.}}(j\omega) = \frac{K_\theta K_o}{(T_\theta T_o (j\omega)^2 + (T_\theta T_o) (j\omega) + 1) + K_\theta K_o}. \quad (4.3)$$

У результаті розв'язання рівняння (рис. 4.3):

$$A(\omega) = \frac{K_\theta K_o}{\sqrt{(-T_\theta T_o \omega^2 + 1 + K_\theta K_o)^2 + (T_\theta T_o)^2 \omega^2}} = 0.01. \quad (4.4)$$

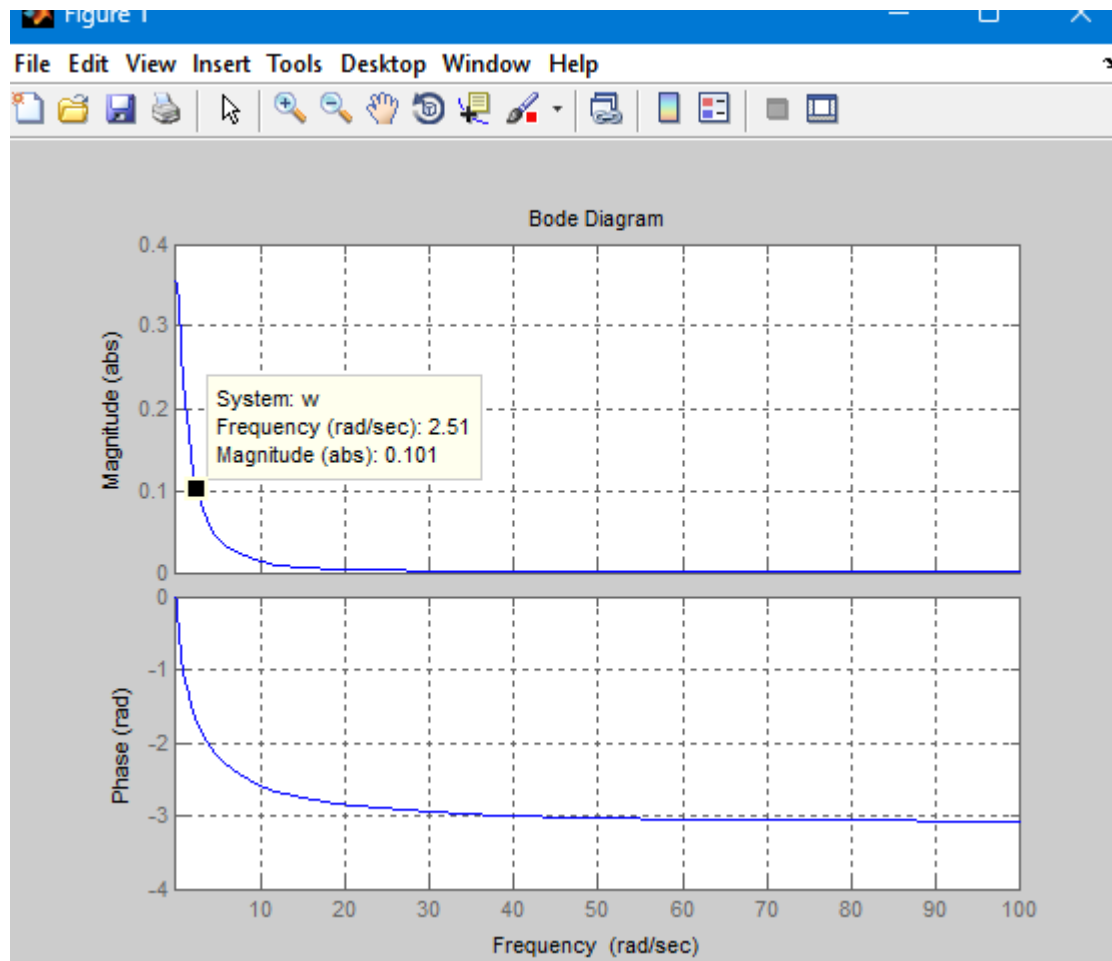


Рис. 4.1 АЧХ системи

Отримаємо значення частоти:

$$\omega_c = 2.51$$

і значення часу квантування:

$$T_k = \pi / \omega_c = 1.25$$

Аналогічно з неперервними системами в цифрових системах можна реалізувати ПІ закон регулювання.

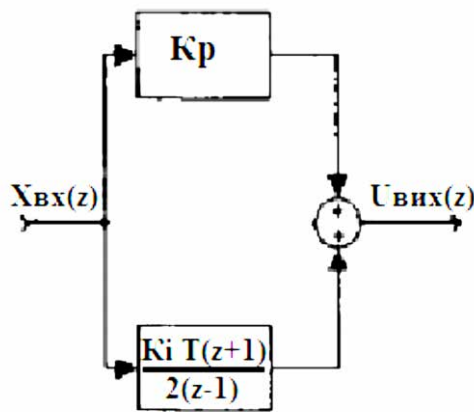


Рис. 4.2 Структурно-алгоритмічна схема цифрового ПІ-регулятора

K_p, K_i – параметри відповідно пропорційної та інтегральної складових ПІ-регулятора,

T – період квантування.

Синтез ПІ-регулятора полягає у знаходженні параметрів K_p, K_i .

Параметр інтегральної складової регулятора, який залежить від добротності за швидкістю K_v неперервної частини, визначається за формулою 4.1:

$$K_i = K_v \lim_{z \rightarrow 1} W_{н.ч.}(z)$$

Добротність за швидкістю визначається залежно від постійної часу об'єкта (таб. 3.2).

Таблиця 4.2

Співвідношення добротності за швидкістю від постійної часу об'єкта

T_o, c	K_v
~ 1	3...10
~ 10	0,3...1
~ 100	0,01...0,04
~ 1000	0,004...0,012

Згідно з таблицею $K_v=3..10$, оскільки $T_o=1.2$ с. Для визначення передаточної функції $W_{н.ч.}(z)$ застосовуємо пакет програм MATLAB (рис 4.3.) , використовуючи операції завдання передаточної функції неперервної системи $w=tf([Ko],[T_v \cdot T_o \ T_v + T_o \ 1])$

```
>> w=tf([5.08*0.07],[0.2*1.2 1.4 1])

Transfer function:
      0.3556
-----
0.24 s^2 + 1.4 s + 1
```

Рис.4.3. Скріншот середовища МАТЛАБ (розімкнена функція)

Z-перетворення неперервної передаточної функції на дискретну $wz=c2d(w,T)$, де w – змінна, що отримала вираз неперервної передаточної функції, T – крок квантування.

При синтезі ПІ-регулятора ми нехтуємо малою постійною часу $ВМ$, оскільки ПІ-регулятор компенсує лише один полюс Z-перетворення неперервної частини.

```
>> c2d(w,1.25)

Transfer function:
      0.2052 z + 0.02451
-----
z^2 - 0.3548 z + 0.0006812

Sampling time: 1.25
```

Рис. 4.4. Визначення передатної функції $W_{н.ч.}(z)$

Виконавши перетворення у програмному продукті Mathcad отримаємо:

$$K_i := \frac{1}{\left(\frac{0.002006 \cdot 1 + 0.01335 + 0.00013}{1^2 - 0.9501 \cdot 1 + 0.05174 + 0.00002} \right)} = 6.565$$

Після знаходження K_i параметр K_p визначаємо таким чином, щоб компенсувати полюс Z-перетворення неперервної частини системи.

Передаточна функція ПІ-регулятора має вигляд:

$$\begin{aligned}
 W_{\Pi}(z) &= \frac{K_i \times T z + 1}{2} \frac{1}{z - 1} = \frac{2 \times K_p \times z - 2 \times K_p + K_i \times T \times z + K_i \times T}{2z - 2} = \\
 &= \frac{(2 \times K_p + K_i \times T)z + (K_i \times T - 2 \times K_p)}{2(z - 1)} = \\
 &= \frac{(2 \times K_p + K_i \times T) \left[z + \frac{K_i \times T - 2 \times K_p}{2 \times K_p + K_i \times T} \right]}{2(z - 1)}
 \end{aligned}$$

Рис 4.5 Передаточна функція ПІ-регулятора

Для компенсації полюсу необхідно знайти такий K_p , який би задовольняв рівняння:

Параметр знаходимо за допомогою програми Mathcad (рис. 4.6.).

$$\begin{aligned}
 &\text{Given} \\
 &\frac{K_i \cdot T - 2 \cdot K_p}{K_i \cdot T + 2 \cdot K_p} = 0.0001974 \\
 &\text{Find}(K_p) = 3.281
 \end{aligned}$$

Рис. 4.6 Знаходження параметру K_p за допомогою програми Mathcad

Для дослідження показників якості роботи системи використовуємо модель у програмному середовищі MATLAB/Simulink (рис. 4.7).

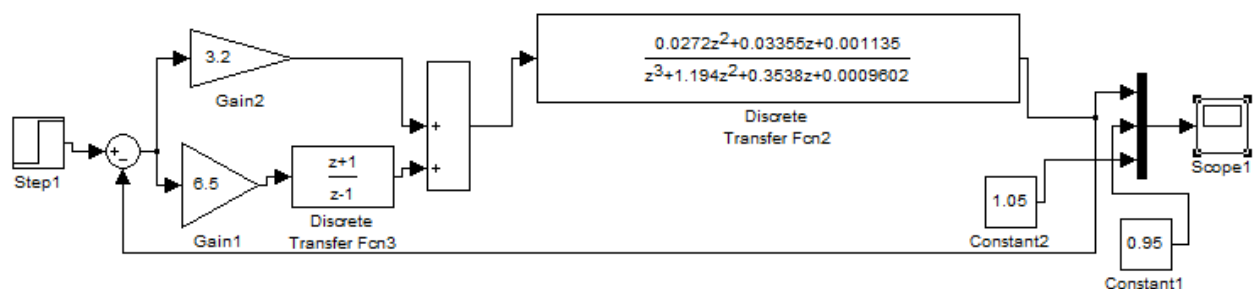


Рис. 4.7. Структурна модель цифрової системи

Та отримаємо перехідний процес системи з ПІ-регулятором.

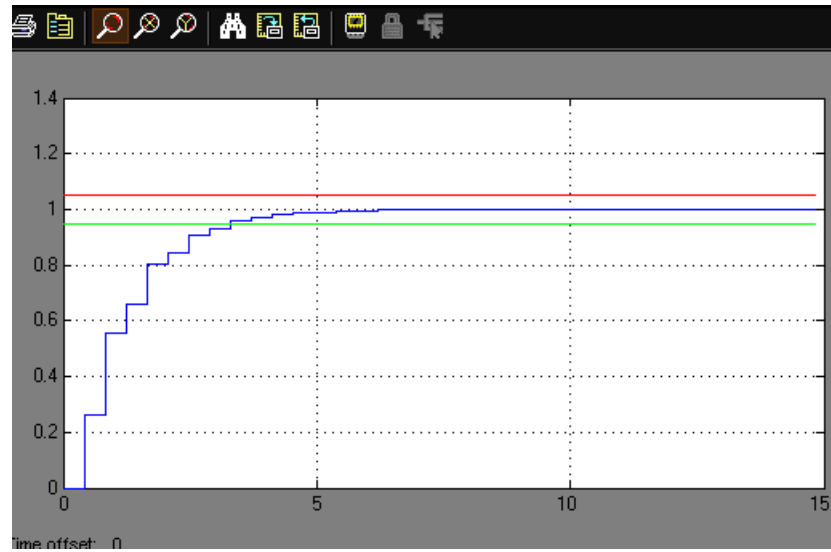


Рис. 4.8 Перехідний процес системи з ПІ-регулятором

РОЗДІЛ 5

РОЗРОБКА СХЕМИ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ПРИНЦИПОВОЇ ТА ЗАСОБІВ ЛЮДИНО-МАШИННОГО ІНТЕРФЕЙСУ ВІЗУАЛІЗАЦІЇ ПРОЦЕСУ КЕРУВАННЯ

5.1. Розробка схеми електричної принципової системи керування ІЧ пастеризатором молока

Обґрунтування та вибір автоматичного вимикача

Згідно з принциповою схемою та при розрахунку параметрів ІЧ пастеризатора (розділ 2) були отримані наступні показники:

- напруга живлення установки 380 В, 50 Гц;
- напруга живлення окремого нагрівача 220 В, 50 Гц;
- споживана потужність групи нагрівачів – 12,6 кВт;
- споживаний струм групи нагрівачів – 57,3 А;

За принциповою схемою для захисту нагрівних елементів від струмів короткого замикання передбачений автоматичний вимикач QF1.

Автоматичні вимикачі вибирають за таких умов:

- номінальна напруга автоматичного вимикача має відповідати напрузі електричної мережі:

$$U_{ав} \geq U_{м}; \quad (5.1)$$

- номінальний струм автоматичного вимикача має дорівнювати номінальному струму нагрівача або трохи перевищувати його:

$$I_{ном.ав} \geq I_{ном.нагр.}; \quad (5.2)$$

- номінальний струм електромагнітних і теплових розчіплювачів має дорівнювати номінальному струму нагрівача або трохи перевищувати його

$$I_{ном.розч.} \geq I_{ном.нагр.}; \quad (5.3)$$

- струм відсічки електромагнітного і теплового розчіплювача має становити:

$$I_{від.розч.} \geq 1,1 \dots 1,2 \cdot I_{нагр.} . \quad (5.4)$$

Вибираємо автоматичний вимикач Schneider Easypact EZC100N - TMD - 60 А (технічні характеристики наведені в таблиці 4.1).

Таблиця 5.1. Технічні характеристики автоматичного вимикача

Номинальна напруга $U_{ав}$, В	~ 230/400 50 Гц - 60/110
Номинальний струм $I_{ном. ав}$, А	80
Номинальний струм відсічки розчіплювачів $I_{ном.розч}$, А	електромагнітний $I_{ном.розч} = 5I_{ном. ав}$ тепловий $I_{ном.розч} = 1,35I_{ном. ав}$
Найбільша вимикаюча здатність струмів короткого замикання, кА	3
Кількість полюсів	3
Захисна характеристика	Z (промислове виконання)
Категорія використання	A (за ГОСТ Р 50030.2)
Механічне виконання	M3, M24 (за ГОСТ 17516.1)
Кліматичне виконання	УХЛ3 (за ГОСТ 15150)
Ступінь захисту	IP30 (за ГОСТ 14254-96)

Вибраний автоматичний вимикач повністю відповідає наведеним умовам (5.1) – (5.4):

$$U_{ав} \geq U_m, 400 \text{ В} > 380 \text{ В};$$

$$I_{ном.ав.} \geq I_{ном.нагр.}, 80 \text{ А} > 57,3 \text{ А};$$

$$I_{ном.розч.} \geq I_{ном.нагр.}, 80 \text{ А} > 57,3 \text{ А};$$

$$I_{від.розч.} \geq 1,1 \dots 1,2 \cdot I_{нагр.};$$

$$I_{від ел-м .розч} = 5 \cdot I_{ном. ав} = 400 \text{ А} > 1,1 \dots 1,2 \cdot I_{нагр} = 68,76 \text{ А};$$

$$I_{від тепл .розч} = 1,35 \cdot I_{ном. ав} = 108 \text{ А} > 1,1 \dots 1,2 \cdot I_{нагр} = 68,76 \text{ А};$$

Розроблено електричну принципову схему системи керування (рис. 5.1). Згідно схеми живлення подається через автоматичні вимикачі до ВМ та кола керування. Коо керування передбачає втоматизоане керування через кнопки перемикування виконавчого механізму, а також автоматичне керування за

алгоритмом роботи із використанням мікроконтролерного пристрою. Мікроконтролерний пристрій живиться від блоку живлення згідно паспортних даних. Сприймаючий елемент контролюючого параметру з’єднано за мікроконтролерним пристроєм.

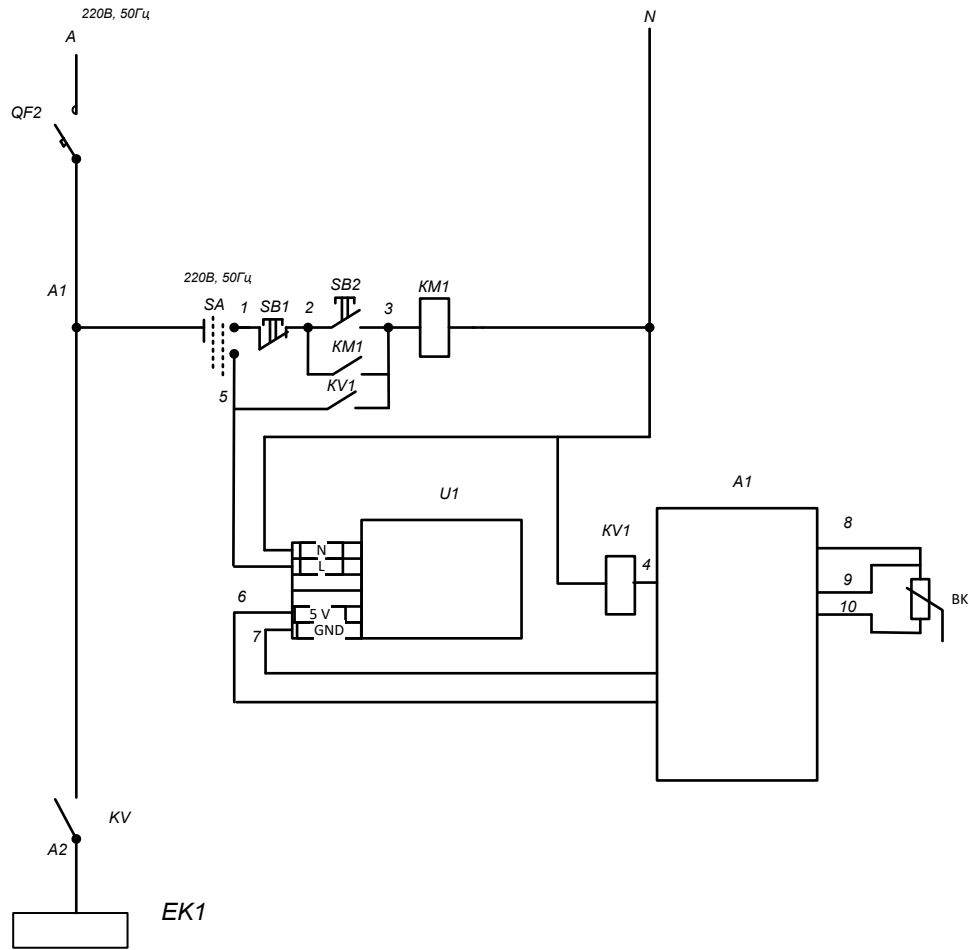


Рис. 5.1 Схема електрична принципова

Наведено таблицю використаних елементів електричної принципової схеми системи керування (Таблиця 5.1)

Таблиця 5.1 Список найменувань електричної принципової схеми

Позиц. познач.	Найменування	Кіл
EK1	Нагрівач	1
QF1	Автоматичний вимикач	1
BK	Температурний перетворювач	1
SA	Перемикач	1
SB1, SB2	Кнопки керування	1
KV1	Твердотільне реле	1
KV2	Твердотільне реле	1
A1	Контролер Arduino	1
G1	Блок живлення	1

Обґрунтування і вибір проводок та способу їх прокладання

Для сільськогосподарських приміщень рекомендовано такі способи виконання електропроводок:

- відкрито проводом - безпосередньо на стінах, на роликах (ізоляторах, клицях), трубах (сталевих або вінілпластових), тросовим проводом;
- сховані - під штукатуркою безпосередньо та у трубах, у замкнених каналах будівельних конструкцій;
- кабелем - безпосередньо на стінах, на тросах.

Проводи напругою вище як 42 В, у нормальних приміщеннях без підвищеної небезпеки прокладають відкрито на висоті 2 м від рівня підлоги чи площадки обслуговування, а нижче 2 м - захищають.

У приміщеннях з підвищеною небезпекою і особливо небезпечні проводки, напругою вище як 42 В, прокладають на висоті 2,5 м від рівня підлоги чи площадки обслуговування. Спуски до пускової апаратури мають бути захищені до висоти 1,5 м.

Зовнішні проводки прокладають на висоті не менш як 2,5 м від поверхні землі. Електричні проводки при паралельному прокладанні з трубопроводами повинні мати відстань від них не менше: для трубопроводів з гарячою та легкозаймистою рідиною - 40 см, для інших - 10 см. У разі пересічення їх з трубопроводами відстань від них має бути не менше: для трубопроводів з гарячою та легкозаймистою рідиною - 10 см, для інших - 5 см.

Відстань від проводів перед вводом у споруду і проводів вводу до поверхні землі повинна бути не меншою за 2,75 м.

Внутрішні проводки повинні мати мінімальну протяжність, тому велике значення надають вибору схеми проводки.

Перерізи кабелів та проводів вибираємо за умовою:

$$I_{\text{тр.доп.}} \geq I_{\text{роз.}}, \quad (4.5)$$

де $I_{тр.доп.}$ - тривало-допустимий струм,

$I_{роз.}$ - розрахунковий струм ділянки електричної мережі.

Напруга живлення одного ІЧ нагрівача - 220 В, споживана потужність – 1,8 кВт. За розрахунковий струм $I_{роз.}$ беремо номінальний струм, який обчислюємо за формулою:

$$I_{ном.} = \frac{10^3 \cdot P_{ном.}}{U_{ном.} \cdot \cos \varphi_{ном.}} = \frac{1800}{220 \cdot 0.83} = 8,19 \text{ А} \quad (4.6)$$

Для підключення кожного ІЧ нагрівача до системи регулювання за табличними даними [21] вибираємо мідний одножильний провід ВВГ з полівінілхлоридною ізоляцією, прокладений відкрито, який має площу поперечного перерізу струмоведучої жили 2,5 мм². Для цього проводу значення тривало допустимого струму дорівнює 30 А.

Робочий струм установки ІЧ пастеризації 57,3 А, потужність – 12,6 кВт. Для підключення її до автоматичного вимикача і мережі живлення використаємо чотирижильний провід ВВГ з перерізом струмоведучої жили 8 мм² і тривало допустимим струмом 62 А (ВВГ 4х8).

5.2. Розробка засобів візуалізації процесу керування ІЧ пастеризатором

Візуалізація процесу керування ІЧ виконано з використанням програмного забезпечення, що надає можливість реалізувати повноцінну SCADA-систему.

Програмне забезпечення виконано в середовищі LabView.

LabView - це середовище розробки і платформа для виконання програм, створених на графічній мові програмування «G» фірми National Instruments.

Говорячи простою мовою, LabView - Це середовище створення додатків для задач збору, обробки, візуалізації інформації від різних приладів, лабораторних установок і т.п. А також для управління технологічними процесами і пристроями.

LabVIEW використовує ряд бібліотек для обміну даними персонального комп'ютера та зовнішніх його пристроїв, серед яких бібліотеки VISA.

VISA, Virtual Instrument Software Architecture - широко використовуваний стандартизований інтерфейс введення-виведення в області тестування і вимірювань для управління приладами з персонального комп'ютера. Підтримує інтерфейси IEEE-488 (GPIB), VXI, RS-232, а також USB для вимірювальних пристроїв. Реалізація VISA (наприклад, NI VISA) являє собою бібліотеку функцій для мов C, Visual Basic і G, які уніфікують доступ до всіх вимірювальним пристроям, незалежно від використовуваного протоколу і апаратури (наприклад, незалежно від моделі GPIB-адаптера).

Інтерфейс VISA передбачає спілкування з приладом в формі «запит- відповідь». Комп'ютер відправляє специфічну для конкретного приладу команду-запит (наприклад, вимога виконати вимір фізичної величини) і чекає відповіді (наприклад, звіт про стан або результати вимірювань) від приладу. Інтерфейс також підтримує специфічні для шини особливості, наприклад, при роботі з GPIB спілкування може також бути ініційовано приладом за допомогою переривання, а для RS-232 можна конфігурувати бітрейт, кількість бітів в кадрі даних і т. д.

Після успішного входу в програмне середовище викликається вікно інтерфейсу системи (лицева панель проекту), де можна обрати порти та складові відлагодження (рис.5.2).

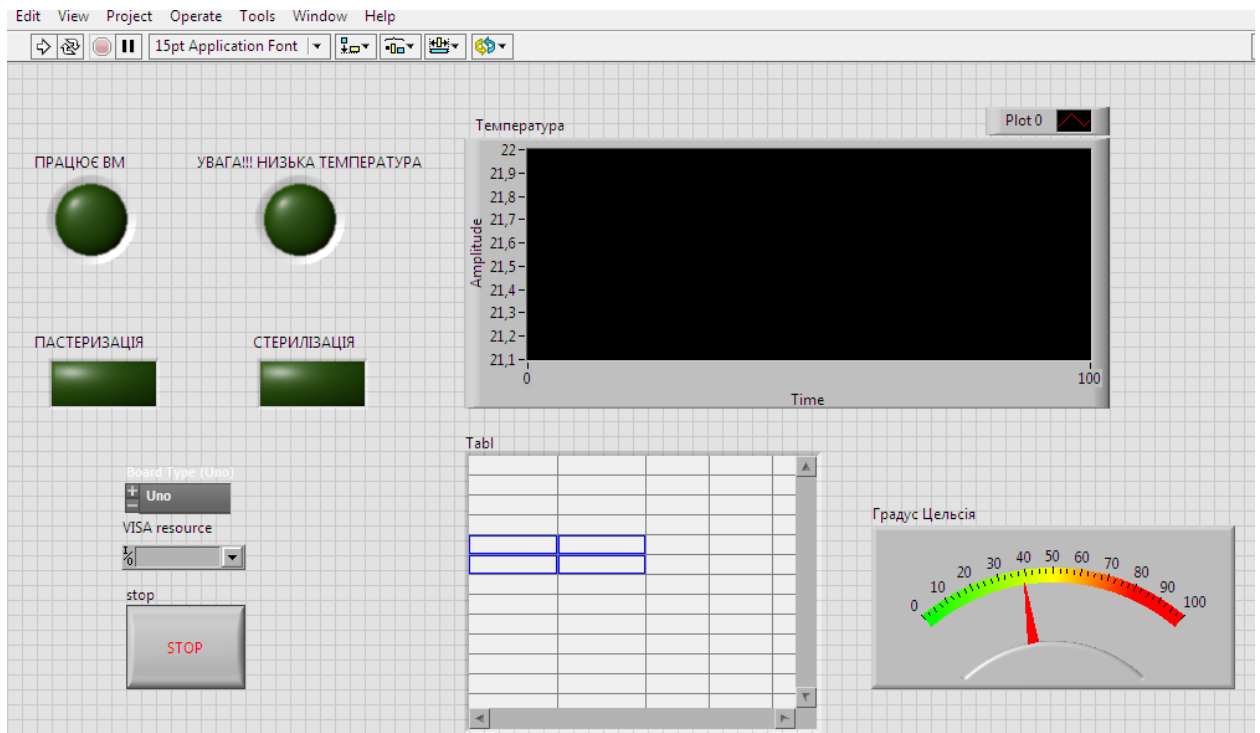


Рис. 5.2. Інтерфейс автоматизованої системи

У розробленому програмі передбачено візуалізацію контрольованого параметра (рис. 5.2).

Програмне забезпечення проекту показано у вікні блок діаграми (рис. 5.3)

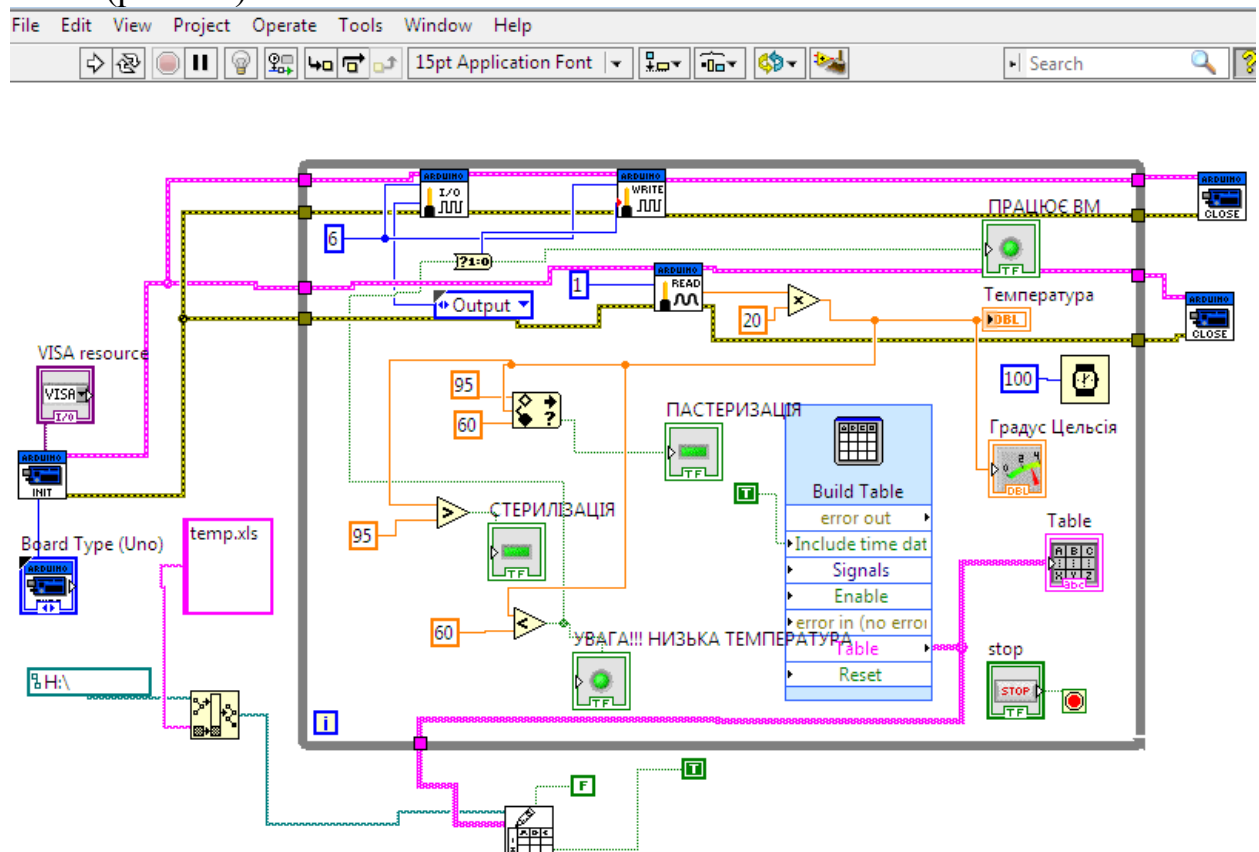


Рис. 5.3 Блок діаграма

Загальний алгоритм роботи системи наведено на рис. 5.4

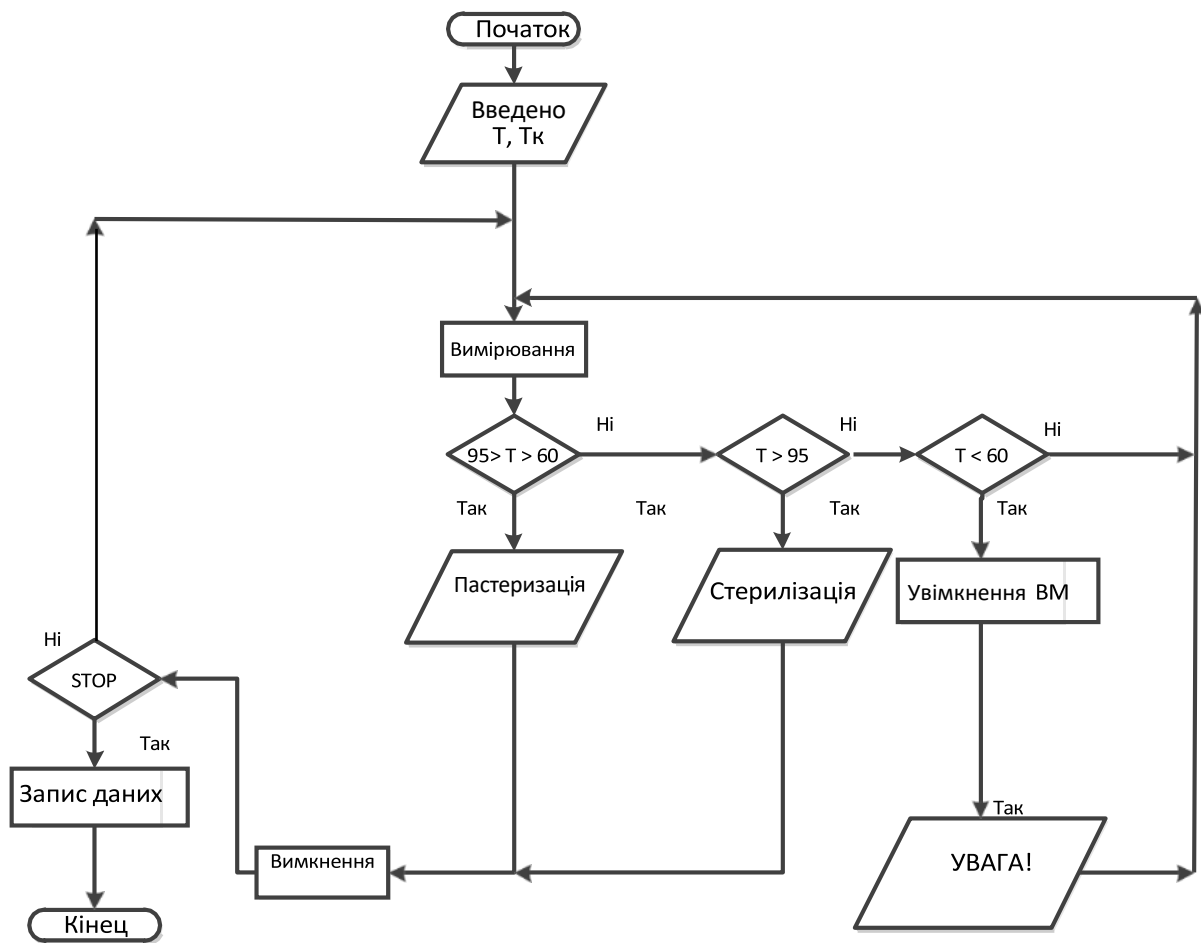


Рис. 5.4 Загальний алгоритм роботи системи керування

РОЗДІЛ 6

РОЗРАХУНОК ЕКОНОМІЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ ВПРОВАДЖЕННЯ РОЗРОБЛЕНОЇ СИСТЕМИ

Технічний рівень засобів електрифікації автоматизації виробничих процесів визначає економічну ефективність використання їх в сільськогосподарському виробництві. Економічна ефективність автоматизації вимірюється ступенем зменшення сукупної живої і минулої праці, що витрачається на виробництво одиниці продукції. Для розрахунку показників економічної ефективності визначимо капітальні вкладення і річні експлуатаційні затрати, капітальні вкладення в систему автоматизації мікроклімату і вологості можна визначити за такою формулою:

$$K = K_3 + K_{т.т} + K_m + K_{пр} + K_i;$$

де K_3 - загальна вартість технічних засобів автоматизації;

$K_{т.т}$ - торгівельно-транспортні витрати;

K_m - витрати на монтаж технічних засобів;

$K_{пр}$ - витрати на прокладення проводок;

K_i - інші капітальні витрати.

Загальна вартість технічних засобів автоматизації становить:

$$K_3 = 7 K_{нагр} + 3K_c + K_{cpu} + K_{ddi} + K_{qf} + 3K_u + K_{витр} + 3K_{vs} + K_n + 12K_r + K_{щ};$$

де: $K_{нагр}$ - вартість ІЧ нагрівача (одного модулю) (1200грн);

K_{cpu} - вартість мікроконтролера (1000 грн);

K_n - вартість насоса (300грн);

$K_{витр}$ - вартість вимірювача витрат рідини (310грн);

K_{ddi} - вартість датчика температури (120);

K_{qf} - вартість автоматичного вимикача (180грн);

$K_{щ}$ - вартість щита керування (1137грн);

Отже: $K_3 = 4247$ грн.

Торгівельно-транспортні витрати будуть становити:

$$K_{т.т.} = 0.11 \cdot K_3 = 0.11 \cdot 4247 = 467,17 \text{ грн.}$$

Витрати на монтаж технічних засобів становлять:

$$K_M = 0.17 \cdot K_3 = 0.17 \cdot 4247 = 722 \text{ грн.}$$

Витрати на прокладення проводок:

$$K_{пр1} = K_{пр1} \cdot e_1; \quad K_{пр1} = 3 \cdot 25 = 75;$$

$$K_{пр2} = K_{пр2} \cdot e_2; \quad K_{пр2} = 8 \cdot 10 = 80;$$

де: $K_{пр1} = 3$ грн./м - вартість проводки ПВ1 1х0,5; $K_{пр2} = 8$ грн./м - вартість проводки АПВ 1х4 та їх монтажу;

e_1 – довжина проводки (одножильний кабель), $e_1 = 25$ м;

e_2 – довжина проводки (чотирьохжильний кабель), $e_2 = 25$ м;

$$K_{пр} = K_{пр1} + K_{пр2}; \quad K_{пр} = 155 \text{ м};$$

Інші витрати будуть становити 2% від суми капітальних вкладень

$$K_i = 0.02 \cdot 2714 = 54.28 \text{ грн.}$$

$$K = 4247 + 467.17 + 722 + 155 = 5591.17 \text{ грн.}$$

Річні експлуатаційні витрати визначаємо за формулою:

$$Z_p = Z_{п} + Z_{утр} + Z_{ел} + Z_{ін},$$

де $Z_{п}$ - річний фонд заробітної плати на обслуговування;

$Z_{утр}$ - затрати на утримання основних засобів виробництва;

$Z_{ел}$ - вартість електроенергії;

$Z_{ін}$ - інші витрати(9%);

$$Z_{п} = Z_{осн} + Z_{дод} + Z_{н},$$

де $Z_{осн}$ -- основна оплата;

$Z_{дод}$ - додаткова оплата;

$Z_{н}$ - нарахування.

$$Z_{осн} = T \cdot S_T,$$

де $T = 500$ грн/р - річна вартість обслуговування системи;

$S_T = 1.69$ - тарифна ставка;

$$Z_{осн} = 500 \cdot 1.69 = 845 \text{ грн};$$

$$Z_{дод} = 10 \% \text{ від } Z_{осн}; \quad Z_{дод} = 84,5 \text{ грн.}$$

$$Z_{н} = (32 \% + 2 \% + 1,5 \% + 1\%) \text{ від } Z_{осн} + Z_{дод};$$

$$З_{\text{н}} = 392.93 \text{ грн.}$$

$$З_{\text{п}} = 845 + 84.5 = 929.5;$$

Затрати на утримання:

$$З_{\text{ут}} = A_{\text{м}} + P_{\text{п}},$$

де $A_{\text{м}}$ - амортизаційні відрахування;

$P_{\text{п}}$ - відрахування на поточний ремонт.

Знайдемо відрахування на амортизацію:

$$A_{\text{м}} = 0.142 \cdot K = 0.142 \cdot 3628 = 515.18 \text{ грн.}$$

Витрати на поточний ремонт будуть становити:

$$P_{\text{п}} = 0.18 \cdot K = 0.18 \cdot 3628 = 653.04 \text{ грн.}$$

Затрати на утримання:

$$З_{\text{ут}} = 515.18 + 653.04 = 1168.22 \text{ грн.}$$

Вартість електроенергії:

$$З_{\text{е}} = P \cdot \Gamma \cdot 25;$$

де P – потужність автоматизації = 0.37 кВт.

Γ – кількість годин роботи = $300 \cdot 24 = 7200$ год. (пастеризатор працює 300 днів на рік).

$$\text{Отже } З_{\text{е}} = 0.37 \cdot 7200 \cdot 0.24 = 639.36 \text{ грн.}$$

$$З_{\text{ін}} = (З_{\text{п}} + З_{\text{утр}} + З_{\text{ел}}) \cdot 3\% = 82.1$$

Отже річні експлуатаційні витрати будуть становити:

$$З_{\text{р}} = З_{\text{п}} + З_{\text{утр}} + З_{\text{ел}} + З_{\text{ін}} = 929.5 + 1168.22 + 639.36 + 82.1 = 2819 \text{ грн.}$$

$$З_{\text{рв}} = 5591.17 + 2819 = 8410.17 \text{ грн.}$$

Експлуатаційні витрати в середньому по даних господарств складають на регулювання - 10000 грн.

Висновок: За рахунок застосування системи автоматичного регулювання річна економія складає $E_{\text{р}} = 10000 - З_{\text{рв}} = 1589.83$ грн.

Строк окупності даної установки становить:

$$T_{\text{ок}} = K \backslash E_{\text{р}} = 10000 \backslash 1589.83 = 6.2 \text{ року.}$$

ВИСНОВКИ

У магістерській кваліфікаційній роботі згідно із завданням розроблено систему автоматичного керування температурним режимом пастеризації молока в апараті з ІЧ випромінюванням та рекуператором.

Актуальність її розробки полягає у можливості інтенсифікувати технологічний процес, підвищити якість готової продукції та знизити питомі витрати електроенергії при використанні інфрачервоного (ІЧ) випромінювання для пастеризації молока.

Встановлено, що використання пучка із 7-ми ІЧ нагрівачів дозволяє знизити потужність кожного з них до 1,8 кВт, забезпечити необхідну довжину хвилі інфрачервоного випромінювання для досягнення необхідної рівномірності та високого ККД нагріву молока.

Проведений розрахунок параметрів енергоспоживання показав, що питомі енерговитрати досліджуваного ІЧ пастеризатора складають 21 кВт·год./т молока, що майже втричі менше за витрати при традиційному способі пастеризації з використанням теплообмінних апаратів.

Вплив випадкових збурень не викликає зміну температури молока за межі $\pm 0,8$ град.

Обґрунтований вибір алгоритму керування температурою пастеризації молока, вибраний комплекс технічних засобів автоматизації Arduino, визначені показники якості роботи цифрової системи керування. Розроблені електрична принципова схема системи керування ІЧ пастеризатором та засоби візуалізації системи керування із людино-машинним інтерфейсом.

ЛІТЕРАТУРА

1. Боженко Л.І. Метрологія, стандартизація, сертифікація та акредитація. – Львів: Афіша, 2006. - 324 с.
2. В.П. Лисенко, І.М. Болбот, В.А. Наливайко, К.В. Наконечна, Т.І. Лендел, Д.Є. Жук. Проектування систем автоматизації для АПК: Підручник. – Київ: ФОП Ямчинський О.В., 2022. – 626 с.
3. В.П. Лисенко, І.М. Болбот, С.А. Шворов, В.В. Коваль, Н.А. Заєць, Т.І. Лендел, К.В. Наконечна, А.І. Болбот. Основні методи та методики підготовки кваліфікаційної роботи магістрів: Навчальний посібник. – Київ: ФОП Ямчинський О.В., 2023. – 462 с.
4. Гвоздєв О.В., Ялпачик Ф.Ю., Рогащ Ю.П., Кюрчева Л.М. Технологічне обладнання для переробки продукції тваринництва: Навч. посібник /За ред. О.В. Гвоздєва. – Суми: Довкілля, 2004. – 420 с.
5. Головінський Б.Л. Теорія автоматичного управління: навч.посіб. / Б.Л. Головінський, Ю.В. Шуруб, В.П. Лисенко. – К.: Вид.Центр НУБіП України, 2012. – 240 с.
6. Дорожовець М. та ін. Основи метрології та вимірювальної техніки: Підручник: У 2 т. / М. Дорожовець, В. Мотало, Б. Стадник, В. Василюк, Р. Борек, А. Ковальчик; За ред. Б. Стадника. – Львів: Видавництво Національного університету "Львівська політехніка", 2005. – Т.2. Вимірювальна техніка. – 656 с.
7. Домарецький В.А., Остапчук М.В., Українець А.І. Технологія харчових продуктів. Київ, 2003. – 572 с.
8. Драганов Б.Х., Міщенко А.В., Борхаленко Ю.О. Основи теплотехніки і гідравліки: Навчальний посібник / За ред. Б.Х. Драганова. – К.: Аграрна освіта, 2010. – 495 с.
9. Ідентифікація та моделювання технологічних об'єктів / В. Лисенко, С. Чернишенко, В. Решетюк, В. Мірошник, Н. Заєць, І. Цигульов. – К.: АграрМедіаГруп, 2016. – 476 с.
10. Котов Б.І. Математичне моделювання динамічних режимів електропастеризатора молока з інфрачервоним випромінювачем / Б.І. Котов, В.О. Грищенко, Ю.І. Панцир, І.Д. Герасимчук. Техніка, енергетика, транспорт АПК, – 2018. №2 (101). С. 23 – 28.
11. Корчемний М.О. Енергозбереження в агропромисловому комплексі. / М. О. Корчемний В. Федорейко, В. Щербань. – Тернопіль: Підручники і посібники, 2001. – 984 с.
12. Кунденко М. П. Розробка нового обладнання для теплової обробки молока [Текст] / М. П. Кунденко // Вісник ХДТУСГ. Проблеми енергозабезпечення в АПК України. – 2001.– №6. – С. 464–467.
13. Кунденко М. П. Удосконалення процесу та обладнання для пастеризації молока інфрачервоним випромінюванням: дис... канд. техн. наук: 05.18.12 [Текст] / М. П. Кунденко. – Харківська державна академія технології та організації харчування. – Харків, 2002. – 188 с.

14. Мастаков Н.Н. Технологія теплової обробки молока: навч. посібник [Текст] / Н.Н. Мастаков. – К.: Вища школа, 1990. – 167 с.
15. Обладнання підприємств переробної і харчової промисловості / І.С. Гулий, М.М. Пушанко, Л.О. Орлов та ін. – Вінниця: Нова книга, 2001. – 576 с.
16. Пастеризатор як об'єкт керування за каналами нагрівання і охолодження молока // В.О. Мірошник, Т.І. Лендел. Науковий вісник НУБіП України. Серія: Техніка і енергетика АПК. №261. К.: Видавництво НУБіП України. 2017. – С.79-88.
17. Скибіцький В.Г. Мікробіологія молока та молочних продуктів: підручник / В.Г. Скибіцький, В.В. Власенко, І.Г. Власенко, М.В. Мельник, Ф.Ж. Ібатулліна, А.М. Соломон. – Вінниця: Едельвейс і К, 2008. – 412 с.
18. Технологія молока та молочних продуктів: навчальний посібник / Власенко В.В., Семко Т.В., Шаблій Л.М, Лавицький В.П. Вінницький національний аграрний університет. – Вінниця: ТОВ «Нілан-ЛТД», 2015. – 330 с.
19. Технологія переробки молока: Навчальний посібник / Ф.В. Перцевий, П.В. Гурський, О.О. Грінченко та ін. – Харків: ХДУХТ, 2006. – 378 с.
20. Технічні засоби автоматизації (Частина 2) / М.В. Лукінюк, В.П. Лисенко, В.Є. Лукін, А.М. Гладкий, С.А. Шворов, А.А. Руденський, А.А. Заверткін. – Ніжин: Видавець ПП Лисенко М.М., 2018. – 455 с.
21. ТОВАЖНЯНСЬКИЙ Л.Л., БУХКАЛО С.І., КАПУСТЕНКО П.О., ОРЛОВА Є.І. Загальна технологія харчових виробництв у прикладах і задачах. Київ, 2005. – 496 с.
22. ТОВАЖНЯНСЬКИЙ Л.Л., БУХКАЛО С.І., КАПУСТЕНКО П.О., ХАВІН Г.Л. Основні технології харчових виробництв і енергозбереження. – Харків: НТУ «ХП», 2005. – 460 с.
23. Чапурін В.А., Пальмов Ф.В., Карпов С.Н. Плівковий інфрачервоний пастеризатор молока // Техніка у сільському господарстві – 1991. - №5 - С.9 – 10.
24. A Systematic Review and Meta-Analysis of the Effects of Pasteurization on Milk Vitamins, and Evidence for Raw Milk Consumption and Other Health-Related Outcomes.
Lauren E. Macdonald, James Brett, David Kelton, Shannon E. Majowicz, Kate Snedeker, Jan M. Sargeant.
Journal of Food Protection.
Volume 74, Issue 11, 1 November 2011, Pages 1814-1832
doi: 10.4315/0362-028X.JFP-10-269. Режим доступу:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0362028X22128449>
25. Молоко коров'яче незбиране. Вимоги при закупівлі (зі змінами): ДСТУ 3662 : 97. – [Чинний від 2002-07-01]. – К.: Держспоживстандарт України, 2002. – 13 с. – (Національні стандарти України)

ДОДАТКИ

ДОДАТОК А1

Порівняння стійкості пастеризованого молока
при різних способах пастеризації

Умови зберігання	Спосіб пастеризації	Тривалість збереження молока без зміни показників, днів					
		За кислотністю	За смаком та запахом	За стійкістю	За бактеріальним обсіменінням	За сортністю	
						За класом із врахуванням бактеріального обсіменіння	За кислотністю
В холодильнику при 4-5°C	ІЧ	15	16	16	3	9	17
	Традиційний	8	12	14	3	8	11