

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

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

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

**ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА
ДО КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ**

на здобуття ступеня вищої освіти «Бакалавр»
зі спеціальності 133 «Галузеве машинобудування»
за освітньою програмою «Обладнання переробних і харчових виробництв»

на тему: **«УДОСКОНАЛЕННЯ ШНЕКОВОГО ЕКСТРУДЕРА НА ОСНОВІ
ЗАСОБІВ АВТОМАТИЗАЦІЇ»**

Виконав:

здобувач вищої освіти _____ Паршуков Сергій Євгенович _____
(прізвище, ім'я, по-батькові) (підпис)

Керівник:

_____ доцент, к.пед.н., Цвіркун Л.О. _____
(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали) (підпис)

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

Здобувач вищої освіти _____
(підпис)

Кривий Ріг
2026

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

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

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Гарант освітньої програми «Обладнання
переробних і харчових виробництв»

Цвіркун Л.О.
« » 2026 року

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

Паршукову Сергію Євгеновичу
(прізвище, ім'я, по-батькові)

1. Тема кваліфікаційної роботи: «Удосконалення шнекового екструдера на основі засобів автоматизації»

Керівник роботи к.пед.н, Цвіркун Л.О.
(науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали)

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

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

3. Вихідні дані до роботи:

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

4. Зміст пояснювальної записки:

1. Вступ.
2. Аналіз обладнання для процесу екструзії.
3. Автоматизація та контроль системи екструзії.
4. Аналіз результатів досліджень.
5. Висновки.

6. Список використаних джерел.

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

Обладнання для екструзії продуктів харчування.

Удосконалений бункер для подачі сировини.

Автоматизована система управління екструдером.

Моделювання температури під час екструзії.

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

7. Календарний план

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи
1	Вступ	05.01.2026-15.02.2026
2	Аналіз обладнання для процесу екструзії	16.02.2026-10.03.2026
3	Автоматизація та контроль системи екструзії	11.03.2026-15.04.2026
4	Аналіз результатів досліджень	16.04.2026-30.04.2026
5	Висновки по роботі	01.05.2026-12.05.2026
6	Оформлення роботи і подання до захисту	16.05.2026-12.06.2026

Здобувач вищої освіти

(підпис)

Паршуков С.Є.

(прізвище та ініціали)

Керівник роботи

(підпис)

Цвіркун Л.О.

(прізвище та ініціали)

РЕФЕРАТ

Обсяг і структура бакалаврської роботи. Повний обсяг бакалаврської роботи – 50 сторінок, в тому числі основного тексту – 47 сторінки. Робота містить 7 рисунків. Список використаних джерел складається з 17 найменувань.

Об'єкт роботи – шнековий екструдер для харчової сировини.

Предмет роботи – процес екструзії.

Мета роботи – удосконалення шнекового екструдера на основі засобів автоматизації.

У роботі зазначено, що застосування сучасних методів контролю до екструзії харчових продуктів є ефективним способом покращення виробництва. Виробництво високоякісних продуктів є необхідним у харчовій промисловості та можливе лише шляхом впровадження доступної системи контролю. Ефективна автоматизація та контроль системи екструзії усувають потенційну можливість людської помилки та можуть покращити оптимізацію процесу.

На основі аналізу, було зазначено, що екструзія харчових продуктів – це процес у якому харчовий матеріал змішується та тече через форму за однієї або кількох умов. Екструдер для сировини – це пристрій, який прискорює процес формування та перетворення харчових інгредієнтів. Екструдери можна використовувати для приготування, формування, змішування, надання текстури та формування харчових продуктів за умов, що сприяють збереженню якості, високій продуктивності та низькій вартості.

Удосконалено автоматизовану систему управління екструдером для забезпечення підтримки параметрів у заданих діапазонах таких як швидкість обертання шнека або налаштування нагріву. Система управління екструдером має такі основні компоненти, керування яким здійснюється за допомогою засобів автоматизації: система подачі, система екструдера (шнек, нагрівальні елементи, різучі елементи), апаратне забезпечення системи керування (датчики та контролери), програмне забезпечення системи керування (програма користувача, графічний інтерфейс користувача, режим керування). Взаємодія між датчиками, контролерами, виконавчими механізмами є необхідним для безперебійної роботи систем керування екструдером.

Запропоновано систему екструдера розділити на три окремі зони: зону подачі (ЗП), зону нагріву (ЗН), зону дозування (ЗД). Встановити додаткові температурні датчики в перехідній зоні між зоною нагріву (ЗН) та зоною дозування (ЗД) задля дотримання прямого контакту з екструзією, що забезпечить контроль температури перед виходом сировини з матриці. Встановлення температурних датчиків ближче до сировини, а саме врівень з внутрішньою стінкою барабана уможливить підвищення точності вимірювання температури.

Вважається за доцільне систему нагріву екструдера розділити на три окремі секції, а саме: зону нагріву 1, зону нагріву 2, зону нагріву 3. Здійснено моделювання контролю температури під час екструзії в секції нагрівання.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: шнековий екструдер, процес екструзії, засоби автоматизації, система контролю, датчики, контролер, система подачі, система екструдера.

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

ЗМІСТ

ВСТУП	6
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ ПРОЦЕСУ ЕКСТРУЗІЇ	7
1.1 Екструзійна обробка продуктів харчування	7
1.2 Типи екструдерів	10
1.3 Процес екструзії в екструдері	12
РОЗДІЛ 2. АВТОМАТИЗАЦІЯ ТА КОНТРОЛЬ СИСТЕМИ ЕКСТРУЗІЇ	18
2.1 Змінні параметри у процесу екструзії	20
2.2 Автоматизований контроль процесу екструзії	20
2.3 Реалізація автоматизованої системи управління екструдером	23
2.4 Система керування температурою в екструдері	32
РОЗДІЛ 3. АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕНЬ	37
3.1 Контроль температури під час екструзії	37
ВИСНОВКИ	43
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	46
ДОДАТКИ	47

					ННІЕТ КНУ.133.ГМБ-22.2026.ПЗ							
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	Удосконалення шнекового екструдера на основі засобів автоматизації			Літ.	Арк.	Аркушів		
Розроб.	Паршуков									5	1	
Перевір.	Цвіркун											
								ННІЕТ КНУ Кафедра ЗІДО				
Н. Контр.	Омельченко											
Затверд.	Цвіркун											

ВСТУП

Актуальність роботи. У роботі зазначено, що застосування сучасних методів контролю до екструзії харчових продуктів є ефективним способом покращення виробництва. Виробництво високоякісних продуктів є необхідним у харчовій промисловості і можливе лише шляхом впровадження доступної системи контролю. Ефективна автоматизація та контроль системи екструзії усувають потенційну можливість людської помилки та можуть покращити оптимізацію процесу.

Мета та задачі дослідження. Удосконалення шнекового екструдера на основі засобів автоматизації.

Практична та наукова новизна. На основі аналізу, було зазначено, що екструзія харчових продуктів – це процес у якому харчовий матеріал змішується та тече через форму за однієї або кількох умов. Екструдер для сировини – це пристрій, який прискорює процес формування та перетворення харчових інгредієнтів. Екструдери можна використовувати для приготування, формування, змішування, надання текстури та формування харчових продуктів за умов, що сприяють збереженню якості, високій продуктивності та низькій вартості.

Удосконалено автоматизовану систему управління екструдером для забезпечення підтримки параметрів у заданих діапазонах таких як швидкість обертання шнека або налаштування нагріву. Система управління екструдером має такі основні компоненти, керування яким здійснюється за допомогою засобів автоматизації: система подачі, система екструдера (шнек, нагрівальні елементи, різучі елементи), апаратне забезпечення системи керування (датчики та контролери), програмне забезпечення системи керування (програма користувача, графічний інтерфейс користувача, режим керування). Взаємодія між датчиками, контролерами, виконавчими механізмами та інтерфейсом людина-машина є необхідним для безперебійної роботи систем керування екструдером.

Запропоновано систему екструдера розділити на три окремі зони: зону подачі (ЗП), зону нагріву (ЗН), зону дозування (ЗД). Встановити додаткові температурні датчики в перехідній зоні між зоною нагріву (ЗН) та зоною дозування (ЗД) задля дотримання прямого контакту з екструзією, що забезпечить контроль температури перед виходом сировини з матриці. Встановлення температурних датчиків ближче до сировини, а саме врівень з внутрішньою стінкою барабана уможливить підвищення точності вимірювання температури.

Вважається за доцільне систему нагріву екструдера розділити на три окремі секції, а саме: зону нагріву 1, зону нагріву 2, зону нагріву 3. Здійснено моделювання контролю температури під час екструзії в секції нагрівання.

					ННІЕТ КНУ.133.ГМБ-22.2026.ПЗ		
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			
Розроб.	Паришуків				Удосконалення шнекового екструдера на основі засобів автоматизації	Літ.	Арк.
Перевір.	Цвіркун						6
							1
Н. Контр.	Омельченко					ННІЕТ КНУ Кафедра ЗІДО	
Затверд.	Цвіркун						

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ ПРОЦЕСУ ЕКСТРУЗІЇ

1.1 Екструзійна обробка продуктів харчування

Екструзія – це процес, за допомогою якого високоякісна сировина виготовляється із простих сировинних матеріалів. Екструзія харчових продуктів – це процес у якому харчовий матеріал змушується та тече через форму, за однієї або кількох умов одночасного змішування, нагрівання та зрізання, при цьому форма призначена для формування та/або пневматичного сушіння інгредієнтів. Екструзійна обробка сировини стала дуже популярним виробничим процесом. Тема екструзійного приготування сировини зараз є надзвичайно важливою в харчовій промисловості. Екструзія є надзвичайно універсальною операційною одиницею, яка може застосовуватися до різноманітних харчових процесів.

Екструзія – це процес, який поєднує кілька одиничних операцій, включаючи змішування, варіння, місіння, зрізання, стискання та формування. По суті, екструдер складається з шнекового насоса, у якому сировина стискається та формується в напівтвердий масив. Ця маса проштовхується через обмежений отвір (матрицю) на вихідному кінці шнека. Екструдер для сировини – це пристрій, який прискорює процес формування та перетворення харчових інгредієнтів [1-5]. Екструзія – це надзвичайно універсальна технологічна операція, яку можна застосовувати в різних харчових процесах. Екструдери можна використовувати для приготування, формування, змішування, надання текстури та формування харчових продуктів за умов, що сприяють збереженню якості, високій продуктивності та низькій вартості. Екструдери можуть використовуватися для приготування, формування, змішування, текстурування та надання форми харчовим продуктам за умов, що сприяють збереженню якості, високій продуктивності та низькій вартості. Використання екструдерів швидко зростає в харчовій промисловості протягом останніх кількох років.

Оскільки екструдери використовуються в багатьох різних операціях, ефективний контроль процесу екструзії харчових продуктів набув великого значення. Переваги автоматизації приготування сировини на екструдерах включають досягнення постійної якості продукції, автоматичний запуск і зупинка, оптимізація процесів та більш ефективно управління інформацією. Процеси екструзії та екструдери розвивалися одночасно у різних галузях протягом останніх двох століть. Дешеві екструдери мали численні механічні проблеми, але пізніші моделі стали більш надійними та широко використовуються для обробки різних харчових продуктів та грубо текстуrowаних продуктів.

					ННІЕТ КНУ.133.ГМБ-22.2026.ПЗ									
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата										
Розроб.		Паришуків			Удосконалення шнекового екструдера на основі засобів автоматизації				Лім.		Арк.		Аркушів	
Перевір.		Цвіркун									7		11	
Н. Контр.		Омельченко							ННІЕТ КНУ Кафедра ЗІДО					
Затверд.		Цвіркун												

Процес екструзії практикується вже понад століття. Він передбачає видавлювання екструдату через отвір для отримання попередньо заданої форми. Для проштовхування матеріалу через обмеження використовується гвинтова спіраль. Матеріал безперервно подається у вхідний отвір екструдера або бункер, у той час як обертання гвинта переміщує сировину вперед. Коли він досягає матриці то тиск зростає до рівня, необхідного для просування екструдату через отвір фільтри. Обертові гвинти транспортують матеріал від входу до вихідної частини циліндра, ковзаючи по поверхні гвинта.

У харчовій промисловості хліб, злаки, макарони, снеки, м'ясо та крохмалі залежать від екструзії. Екструзійне приготування можна визначити як «процес, під час якого зволожені, розширювані, крохмалисті та/або білкові матеріали пластизуються та готуються в трубці за допомогою поєднання вологості, тиску, температури та механічного зсуву» [1]. Тема екструзійного приготування сировини нині має велике значення у переробці харчових продуктів. Оскільки екструдери застосовуються в такій великій кількості різноманітних операцій, їх вважають універсальними процесами. Більшість нових підприємств у країнах першого світу встановлюють екструдери замість традиційних систем переробки.

Екструзія – це просте операційне формування пластичного або тістоподібного матеріалу шляхом його проштовхування через обмеження або форму. Також можна вважати, що «Екструзія – це процес, під час якого харчовий матеріал змушується текти через форму під одним або кількома умовами змішування, нагрівання та зсуву, форма призначена для формування та/або пудингового висушування інгредієнтів». Харчовий екструдер – це пристрій, який формує та реструктурує заздалегідь приготовані харчові інгредієнти. Екструдери дуже універсальні та можуть використовуватися для приготування, формування, змішування, текстурування та надання форми харчовим продуктам за умов, що сприяють збереженню якості, високій продуктивності та низькій вартості. Екструдери мають широкий спектр умов експлуатації, які застосовуються у харчовій промисловості. Нижче наведено деякі з цих функцій [1, 2]:

- агрегація: інгредієнти можуть стискатися та агломеруватися в окремі шматки;
- видалення газів: інгредієнти, що містять газові порожнини, можуть бути дегазовані;
- зневоднення: під час звичайної екструзійної обробки може відбутися втрата вологи на 4-5%;
- розширення: через високий тиск і температуру, що можливі всередині екструдера, продукти можуть розширюватися, утворюючи пухкі форми, наприклад, сирні завитки;
- желатинізація: екструзійна обробка покращує желатинізацію крохмалю.
- помел: інгредієнти можна подрібнювати в циліндрі екструдеру під час обробки;
- гомогенізація: екструдер може гомогенізувати, перебудовуючи непривабливі інгредієнти у більш прийнятні форми;

- змішування: доступний широкий спектр конфігурацій гвинтів, які можуть забезпечити необхідний рівень змішування в бочці екструдера;
- пастеризація та стерилізація: інгредієнти можна пастеризувати та/або стерилізувати за допомогою екструзійної технології для різних застосувань;
- денатурація білка: екструзійна обробка може денатурувати білки тваринного та рослинного походження;
- формування: екструдер може виготовляти будь-яку бажану форму виробу, змінюючи матрицю на кінці циліндра екструдера;
- зсув: спеціальна конфігурація всередині циліндра екструдера може створювати необхідний зсув для конкретного продукту;
- зміна текстури: фізичну текстуру можна змінювати в екструзійній системі;
- термічна обробка: бажаний кулінарний ефект можна досягти в екструдері;
- уніфікація: різні лінії інгредієнтів можна об'єднати в один продукт для створення особливих властивостей за допомогою екструдера.

Основні переваги технології екструзії порівняно з традиційними методами такі [1-5]:

- адаптивність: змінюючи умови роботи та незначні інгредієнти, можна отримати широкий спектр різних продуктів з тих самих базових сировинних матеріалів;
- характеристики продукту: процес екструзії дозволяє отримувати широкий спектр форм, кольорів, текстур та зовнішнього вигляду, який неможливий із використанням традиційних систем;
- енергоефективність: екструдери працюють при відносно низькій вологості, тому після виробництва потрібне менше сушіння;
- низька вартість: екструзія має нижчу собівартість обробки порівняно з іншими процесами приготування та формування. Процес екструзії дозволяє заощадити сировину 19%, працю 14%. Також потрібно менше місця на одиницю операції. Висока продуктивність та автоматизований контроль: Безперервний високопродуктивний процес екструзії може бути повністю автоматизований;
- висока продуктивність та автоматизований контроль: безперервну роботу екструдера з високою пропускною здатністю можна повністю автоматизувати;
- нові продукти харчування: процес екструзії може модифікувати білки тваринного та рослинного походження, крохмалі та інші харчові матеріали для виробництва різноманітних нових і унікальних продуктів харчування;
- висока якість продукту: оскільки екструзія є процесом нагрівання при високій температурі протягом короткого часу, вона мінімізує руйнування поживних речовин у продуктах, одночасно покращуючи засвоюваність білків та крохмалю;
- безвідходність: екструдер виробляє мало або зовсім не виробляє відходів.

					ННІЕТ КНУ.133.ГМБ-22.2026.ПЗ	Арк.
						9
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

1.2 Типи екструдерів

Шнекові екструдери зазвичай класифікують відповідно до кількості механічної енергії, яку вони можуть генерувати. Екструдер низького зсуву призначений для мінімізації механічної енергії, щоб уникнути варіння тіста, наприклад для екструзії пасти. Екструдер високого зсуву розроблений для генерації високого рівня механічної енергії, яка перетворюється на тепло для приготування тіста. Можна встановлювати альтернативні джерела енергії для досягнення ще вищого рівня тепла для приготування екструдованого матеріалу. Ці альтернативні джерела енергії можуть включати нагріте масло, розташоване всередині кожуха, що оточує циліндр екструдера, або елементи-картриджі, розташовані зовні на циліндрі екструдера [3-5]. Існують різні типи екструдерів у харчовій промисловості. Екструдери можна розрізняти за способом їх роботи: безперервні або переривчасті. Безперервні екструдери обладнані обертовими частинами, тоді як переривчасті екструдери видавлюють сировину у повторюваному режимі. Принцип роботи цієї машини дуже простий: матеріал потрапляє в бункер екструдера зазвичай під дією сили тяжіння і проштовхується вниз уздовж ствола обертанням гвинта. Простовхування створює тертя між стінками ствола і гвинтом, тим самим генеруючи теплову енергію, необхідну для стиснення матеріалу.

Одношнекові екструдери використовують зсувний потік для переміщення матеріалу вздовж циліндра та створення тиску біля фільтри. Коли сировина просувається вперед, він не повинен обертатися разом із шнеком. Зсув або тертя об стінку циліндра сприяють просуванню матеріалу вперед, обмежуючи його обертання разом із шнеком. Одношнекові екструдери в основному використовуються для виробництва снєків та пластівців для сніданку [1, 2, 12]. Більшість екструдерів обладнані гвинтом як основним компонентом змішування. Одношнекові екструдери є найпоширенішим типом екструдерів, що використовуються в харчовій промисловості, через їх просту конструкцію, відносно низьку вартість та надійність. Їхній гвинт має лише одну зону стиснення, хоча гвинт має три чітко виражені геометричні секції: перша секція (найближча до живильної горловини) зазвичай має глибокі канавки. Матеріал у цій секції буде переважно перебувати в твердому стані – ця секція називається живильною секцією гвинта. Остання секція зазвичай має неглибокі канавки, матеріал у цій секції буде переважно в розплавленому стані – ця секція гвинта називається дозувальною секцією. Між ними розташована перехідна секція або секція стиснення. У більшості випадків глибина каналу гвинта зменшується лінійно, переходячи від живильної секції до дозувальної, що призводить до стиснення матеріалу в каналі гвинта.

Одношнековий екструдер використовує течію тертя для переміщення матеріалу вздовж циліндра та створення тиску на фільтрі. Щоб тісто просувалося вперед, воно не повинно обертатися разом із обертовим шнеком. Це можна порівняти з гвинтом, який обертається разом з гайкою; він не буде затягнутий. Коли гайка зафіксована, вона рухається вперед при обертанні гвинта. Спротив і тертя між матеріалом та барабаном забезпечують просування

					ННІЕТ КНУ.133.ГМБ-22.2026.ПЗ	Арк.
						10
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

матеріалу вперед. Всередині барабана вирізані канавки для сприяння прилипання до стінки барабана, який генерує власне тепло через високе тертя. Деякі мають нагрівальні кожухи, але найчастіше генерує власне тепло, що означає, що для кожного продукту, швидкості подачі, швидкості гвинта та подачі води екструдер має певні параметри робочої точки [1, 2]. Точка, де температура досягає максимуму через виділення механічної енергії. Одношнековий екструдер зазвичай використовують для простих типів сировини, закусок та сніданкових пластівців. Швидкість виробництва та якість продукту значно змінюються під час процесу екструдювання через нерівномірний розподіл тиску вздовж циліндра. Температуру також важко контролювати. Якість продукту, отриманого за допомогою одношнекового екструдера дуже низька і непостійна, майже не відбувається змішування. Це означає, що можна виробляти тільки прості інгредієнти за допомогою одного гвинта.

Двошнекові екструдери з протилежним обертанням запобігають ефекту «циліндризації» у циліндрі та чинять позитивний витісняючий вплив на матеріал. З протилежно обертовими шнеками можна досягти надзвичайно високого тиску на фільтрі, однак ці екструдери мають слабкі змішувальні властивості. Застосування таких екструдерів у харчовому виробництві зазвичай обмежується системами з низькою в'язкістю, наприклад, лакриця. Двошнекові екструдери функціонують подібно до одношнекових екструдерів, за винятком того, що вони більш ефективні завдяки наявності двох шнеків, які ефективніше генерують і змішують полімери. Шнек виконує функцію генерування тепла під час обертання. Процес генерації тепла досягається шляхом тертя між стінками циліндра та шнеком. В деяких екструдерах шнеки обертаються в одному напрямку, а в інших – у протилежних [1, 2, 12]. Конструкція подвійного шнекового екструдера дозволяє використовувати його для конкретних операцій. Обертові двошнекові екструдери стали популярними в харчовій промисловості через їхню високу продуктивність та покращену здатність до змішування. Самочистячі шнеки запобігають накопиченню інгредієнтів на поверхні циліндра, що може викликати стрибки й порушення просування через циліндр. Екструдери можна експлуатувати на вищих швидкостях шнеків, ніж протилежно-обертові, оскільки радіальні сили розподіляються більш рівномірно. В цілому, двошнекові екструдери пропонують найбільшу гнучкість у виробництві широкого спектра харчових продуктів.

Вищезгадані та інші недоліки, призвели до розвитку двошнекових екструдерів. Найпоширенішим та найбільш переважним двошнековим екструдером є екструдер з двома одночасно обертовими шнеками, що йдуть взаємозчепленими поруч один з одним. Як і одношнековий екструдер одночасно обертовий двошнековий екструдер є пристроєм з перетіканням зсувом. Проте можливість сировини обертатися разом зі шнеком обмежується лопаттю другого шнека. Такі шнекові екструдери забезпечують кращу транспортуваність і більш вузький розподіл часу перебування порівняно з одношнековими екструдерами. Можливості транспортування дозволяють їм

обробляти клейкі та інші важко транспортувані харчові інгредієнти. двошнекових екструдерів. Двошнекові екструдери забезпечують найбільшу гнучкість для виробництва широкого спектру харчових продуктів. Матеріал передається з одного гвинта на інший. Механізм потоку є комбінацією зсувного потоку та потоку із позитивним витісненням. Таким чином, двошнековий екструдер забезпечує повний контроль над температурою, тиском і якістю продукту. Як зазначалося раніше, змінивши лише один із параметрів, можна отримати зовсім інший продукт. Повний контроль над параметрами роблять його найуніверсальнішим обладнанням для переробки харчових продуктів у світі. Переваги двошнекового екструдера полягають у наступному [1-5]:

- обробляють в'язкі, масляні, липкі або дуже водянисті матеріали та деякі інші продукти;
- мають позитивний насосний ефект і зменшене пульсування на фільтрі;
- знос менший у дрібних частинах машини порівняно з одношнековими екструдерами;
- забезпечують неппульсуюче подавання;
- можна використовувати широкий діапазон розмірів частинок (від тонкого порошку до зерен), тоді як одношнекові екструдери обмежені певним діапазоном розмірів частинок;
- очищення дуже просте завдяки самоочисній характеристиці;
- барабанна головка може бути розділена на два різні потоки;
- забезпечують легший масштаб процесу від експериментальної установки до великомасштабного виробництва.

Зазначені вище переваги роблять екструдер із двома співобертовими гвинтами очевидним вибором для розробки місцевого екструдера. Екструдери для високотемпературного короткочасного приготування є універсальними обробними машинами. Вони можуть використовувати різноманітну сировину та рецептури для виробництва нових і вже існуючих продуктів. Декілька прикладів: сніданкові пластівці, розпушені снеки, лакриця, напівготова паста, дитяче харчування, снеки тощо.

1.3. Процес екструзії в екструдері

Екструдери для швидкої термічної обробки при високих температурах є універсальними обробними машинами, які можуть виробляти широкий асортимент продуктів. Екструдер можна керувати, контролюючи певні параметри процесу, щоб виробляти широкий спектр розроблених продуктів харчування. Умови процесу та рецепти можна змінювати, щоб змінити кінцевий продукт. Екструзійна машина складається з кількох компонентів, які є спільними для всіх процесів екструдювання (рис. 1.1). Основні пресуючі компоненти обертового екструдера складаються з наступного: бункер для зберігання, система подачі, вузол екструдера, матриця, різак та дозуючий насос.

Сировина подається у накопичувальний бункер приймальний лоток за допомогою шнека або транспортного пристрою. Накопичувальний бункер

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

забезпечує буферну кількість сировини, щоб екструдер міг працювати безперервно, а саме без перерв. Сировина рівномірно подається з бункера за допомогою шнека з регульованою швидкістю. Шнековий подавач також може подавати сировину безпосередньо у вхідний бункер екструдера. Попередній кондиціонер є допоміжним компонентом процесу, призначеним для покращення якості продукту та/або збільшення його виходу.)

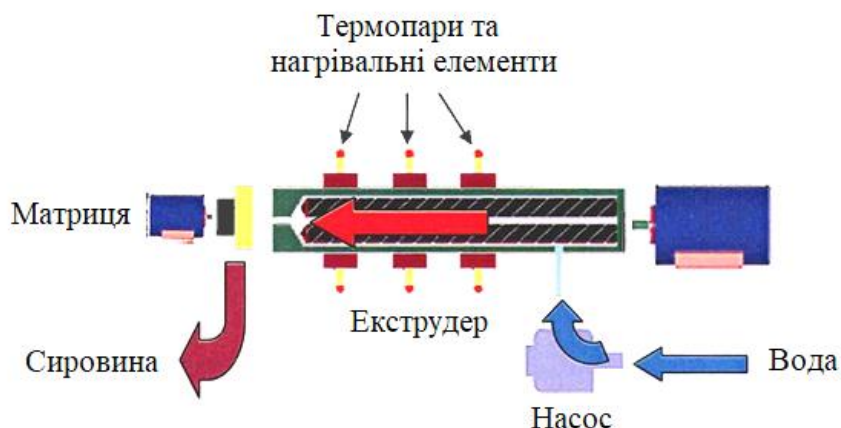


Рисунок 1.1 – Екструзійна машина

Після того як матеріал подається в екструдер, рух співобертових гвинтів просуває матеріал вперед. У циліндр впорскується вода для додавання додаткової енергії у процесі обробки. Нагрівальні елементи додають додаткове тепло в процес екструзії для приготування матеріалу. Тістоподібна сировина потім проштовхується через матрицю, щоб надати остаточну форму продукту. Різальний пристрій використовується для нарізання екструзійного профілю на потрібну довжину.

Розглянемо окремі компоненти двошнекового екструдера:

1. Бункер для подачі забезпечує буфер запасу сировини на вході в екструдер, щоб екструдер міг працювати безперервно, як зазначалося раніше. Бункер діє як короткочасний пристрій для зберігання сировини. Конструкція бункера та тип сировини можуть сильно впливати на сталість потоку. Засмічення або створення містків із сировини всередині бункера є поширеною проблемою, яка перешкоджає потоку сировини через отвір бункера. Щоб запобігти цій проблемі, бункер має бути оснащений пристроєм для забезпечення рівномірного потоку. Для бункерів екструдерів використовуються два основні типи сухих дозаторів: об'ємні та гравітаційні.

Системи подачі є важливим елементом будь-якої екструзійної системи. Якість подачі продукту, в першу чергу визначається сумішшю інгредієнтів та швидкістю подачі. Система подачі для екструдерів у харчовій промисловості майже завжди складається з трьох основних компонентних секцій. Зазвичай швидкість екструзії харчових продуктів контролюється дозуючим пристроєм або шнеком подачі [1-5]. Об'ємна подача інгредієнтів може бути забезпечена через шнеки або шнекові конвеєри з регульованою швидкістю. У об'ємних дозаторах дрібнодисперсні матеріали схильні до аерації або затримки повітря в бункері подачі, що часто може призводити до нерівномірного потоку.

Вертикальні конічні бункери можна використовувати для подачі сировини під час процесу екструзії. Використовується шнек з змінною швидкістю подачі для рівномірного вивантаження матеріалу з бункера. Подача за принципом втрати ваги (гравітаційна) може бути досягнута шляхом встановлення розробленого та виготовленого вузла подачі або тензодатчиків. Вібраційного тип подавачі з регульованою частотою або ходом також можуть використовуватися як гравіметричні пристрої. Вагові ремені також використовуються для гравітаційного дозування інгредієнтів. Гравітаційний дозатор ґрунтується на зважуванні матеріалу для досягнення необхідної швидкості витрати/подачі або ваги партії. Гравіметричний дозатор – це об’ємний дозатор на вагах з системою зворотного зв’язку. Цей підхід слід використовувати, коли [1]:

- вимагається точність менше $\pm 2\%$;
- об’ємна густина сировини змінюється залежно від відсотка заповнення бункера живильника.

Точність подачі $\pm 0,5\%$ іноді досягається при правильно спроектованій гравіметричній системі подачі. Існує в основному два способи гравіметричної подачі: безперервна та пакетна. Більшість екструдерів виробничого розміру є безперервними пристроями з підживленням за принципом голодування, де продуктивність визначається швидкістю подачі сухої сировини від шнека подавача до циліндра екструдера [1-5]. Система безперервного гравітаційного дозування контролює вагу на одиницю часу (вага/одиниця) у кг/год (кілограм на годину), тоді як пакетна система просто контролює вагу матеріалу, наприклад, 50 кг матеріалу з міксера. Гравітаційні системи дозування стали стандартом для більшості систем екструзійної обробки.

2. Складальний вузол екструдера. Складальний вузол екструдера складається з обертових гвинтів і циліндра (рис. 1.2).

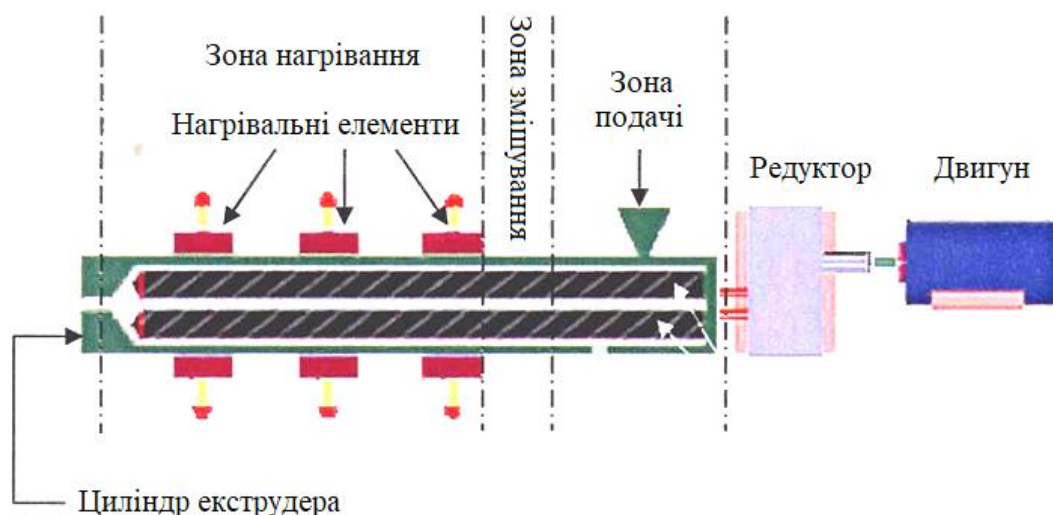


Рисунок 1.2 – Зони екструдера

Співобертний двогвинтовий харчовий екструдер повинен виконувати декілька дій за короткий час від точки, де сировина або попередньо оброблений

матеріал подається в екструдер, до моменту його вивантаження з екструдера. Контрольовані, безперервні умови роботи в сталому режимі включають: нагрівання, охолодження, транспортування, подача, стиснення, змішування, плавлення, приготування, текстурування та формування.

Обертові гвинти. Існує безліч конфігурацій гвинтів але звичайною практикою є налаштування гвинтів як серії елементів для транспортування та змішування. Конвеєрні гвинти створюють тиск, щоб матеріал рухався вперед. Послідовності та дії всередині барабана можна розділити на різні зони обробки. Ці зони включають зону подачі, зону замішування та зону остаточного приготування, залежно від конфігурації шнека.

Зона подачі є ділянкою, де в інтервал бочки вводяться низькодисперсні, окремі частинки сировини. Часто попередньо підготовлений матеріал потім транспортується далі в середину камери. Щільність низька через повітря, захоплене всередині матеріалу. Зазвичай воду вводять у зону подачі бочки, щоб посилити провідність тепла та змінити розвиток текстури й в'язкості. Коли сировина транспортується в зону змішування її додатково стискають і канал потоку екструдера досягає більшого ступеня заповнення. Щільність екструдату починає зростати, втрачаючи свою зернистість [1-5, 12]. Тиск у бочці зростає, коли екструдат проходить через зону замішування. Коли екструдат рухається вперед, він перетворюється на текучу масу тіста і досягає максимальної ущільненості. У фінальній зоні нагрівання температура та тиск зростають найшвидше. Саме тут відбувається текстурування і де швидкість зрізу гвинтової конфігурації та стискання екструдату є найвищою. З зони нагрівання екструдат виходить із циліндра через матрицю, щоб отримати бажану кінцеву текстуру продукту, його щільність, колір та функціональні властивості.

Зазвичай циліндр складається з сегментів, які з'єднуються болтами, утворюючи канал, у якому можуть обертатися гвинти та переміщувати матеріал. Ствол можна обладнати додатковою оболонкою для циркуляції води або олії навколо ствола з метою охолодження екструдату або для додаткового нагріву. Охолоджуюче або нагрівальне середовище ніколи не вступає в прямий контакт з екструдатом. Також можна встановити нагрівальні елементи для нагріву ствола.

Форма та різак. Бочка закрита формою, через яку повинен проходити екструзійний матеріал (рис. 1.3). Форма містить одне або кілька отворів, які надають кінцевому продукту потрібну форму, і забезпечує опір руху шнеків. Форми розроблені так, щоб бути максимально обмежувальними для збільшення заповнення бочки, часу перебування матеріалу та вводу енергії, а матриця складається з перехідної частини [1-5]. Екструдат проходить через перехідну фазу, а потім примусово протискається через отвір матриці. Різак, розташований перед отвором матриці, розрізає сформований екструдат на потрібні довжини. Регульований привод змінної швидкості контролює швидкість різання лез різака. Коли швидкість збільшується, екструдат розрізається на коротші відрізки, і навпаки, коли швидкість різання зменшується. Матрицю можна розглядати як фіксовану контрольну змінну для конкретного застосування.

					ННІЕТ КНУ.133.ГМБ-22.2026.ПЗ	Арк.
						15
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

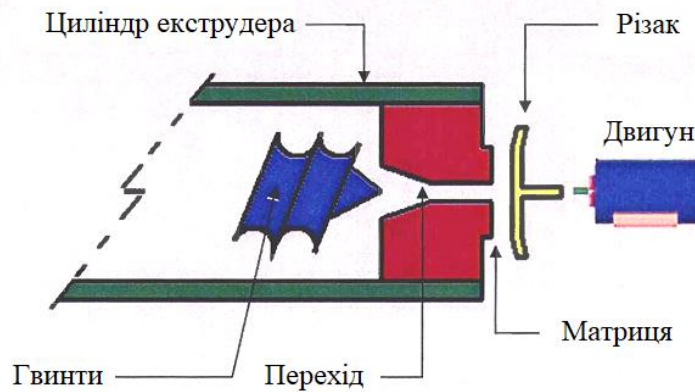


Рисунок 1.3 – Конфігурація матриці та різака

Під час обробки в екструзійній системі можуть виникати численні проблеми, деякі з яких безпосередньо пов'язані з управлінням системою та досвідом оператора. До таких проблем належать нестабільна робота, заклинювання, деформація виробу, коливання щільності продукту, зміна кольору та зниження швидкості подачі. Усе вище зазначене можна виправити, змінивши деякі технологічні параметри. Нестабільна робота виникає, коли екструдер працює не на повну потужність. У цьому випадку проблему можна вирішити, зменшивши швидкість обертання гвинта екструдера та збільшивши швидкість подачі або перекривши частину отворів матриці.

Коли відбувається заклинювання, продукт нерівномірно протікає через форму, а ніж ріже екструдат товще з одного боку. Причиною цієї проблеми може бути занадто велика кількість ножів, що ріжуть екструдат. Щоб виправити цю проблему, необхідно зменшити кількість ножів і збільшити швидкість різання. Продукт може деформуватися, якщо він занадто м'який або недостатньо прожарений. Вирішенням цієї проблеми може бути зменшення вологості в барабані. Щільність є функцією розширення, розміру та форми. Відхилення щільності продукту можна виправити за допомогою заміни зношених штампів, збільшення швидкості подачі, охолодження барабана або збільшення вмісту крохмалю в рецептурі [1-5, 12]. Колір зазвичай залежить від процесу нагрівання, розміру частинок інгредієнтів та доданого барвника. Контролювати відхилення кольору можна шляхом зміни подачі сухої сировини та додавання вологи. Зменшення швидкості подачі є наслідком зношених сегментів гвинта і спричиняє зворотний потік матеріалу. Ситуацію можна тимчасово виправити, збільшуючи швидкість гвинта, але доведеться встановити нові сегменти гвинта. Іншою можливою причиною зниження швидкості подачі може бути підвищена в'язкість екструдату. Зменшення додавання олії або води у рецептурі може вирішити цю проблему. Одним із можливих шляхів розв'язування проблем, що виникають у процесі екструзійної обробки є удосконалення автоматизованого контролю системи екструзії.

На основі вище зазначеного можна вважати, що екструзія – це процес, за допомогою якого високоякісна сировина виготовляється із простих сировинних матеріалів. Екструзія харчових продуктів – це процес у якому харчовий

матеріал змушується та тече через форму за однієї або кількох умов. Тому технологія поєднує кілька одиничних операцій, включаючи змішування, варіння, місіння, різання, стискання та формування. По суті, екструдер складається з шнекового насоса, у якому сировина стискається та формується в напівтвердий масив. Ця маса проштовхується через обмежений отвір (матрицю) на вихідному кінці шнека.

Зазначено, що екструдер для сировини – це пристрій, який прискорює процес формування та перетворення харчових інгредієнтів. Екструзія – це надзвичайно універсальна технологічна операція, яку можна застосовувати в різних харчових процесах. Екструдери можна використовувати для приготування, формування, змішування, надання текстури та формування харчових продуктів за умов, що сприяють збереженню якості, високій продуктивності та низькій вартості. Екструдери можуть використовуватися для приготування, формування, змішування, текстурування та надання форми харчовим продуктам за умов, що сприяють збереженню якості, високій продуктивності та низькій вартості. Використання екструдерів швидко зростає в харчовій промисловості протягом останніх кількох років.

Аналіз наукових джерел дав змогу здійснити класифікацію екструдерів. Шнекові екструдери зазвичай класифікують відповідно до кількості механічної енергії, яку вони можуть генерувати. Екструдер низького зсуву призначений для мінімізації механічної енергії, щоб уникнути варіння тіста, наприклад для екструзії пасти. Екструдер високого зсуву розроблений для генерації високого рівня механічної енергії, яка перетворюється на тепло для приготування тіста. Можна встановлювати альтернативні джерела енергії для досягнення ще вищого рівня тепла для приготування екструдованого матеріалу.

Існують різні типи екструдерів у харчовій промисловості. Екструдери можна розрізнати за способом їх роботи: безперервні або переривчасті. Безперервні екструдери обладнані обертовими частинами, тоді як переривчасті екструдери видавлюють сировину у повторюваному режимі. Принцип роботи цієї машини дуже простий: матеріал потрапляє в бункер екструдера зазвичай під дією сили тяжіння і проштовхується вниз уздовж ствола обертанням гвинта. Проштовхування створює тертя між стінками ствола і гвинтом, тим самим генеруючи теплову енергію, необхідну для стиснення матеріалу.

Вважається, що одношнекові екструдери є найпоширенішим типом екструдерів, що використовуються в харчовій промисловості, через їх просту конструкцію, відносно низьку вартість та надійність. Їхній гвинт має лише одну зону стиснення, хоча гвинт має три чітко виражені геометричні секції: перша секція зазвичай має глибокі канавки. Одношнековий екструдер зазвичай використовують для простих типів сировини, закусок та сніданкових пластівців. Швидкість виробництва та якість продукту значно змінюються під час процесу екструдкування через нерівномірний розподіл тиску вздовж циліндра. Двошнекові екструдери можна експлуатувати на вищих швидкостях шнеків, ніж протилежно-обертові, оскільки радіальні сили розподіляються більш рівномірно. В цілому, двошнекові екструдери пропонують найбільшу гнучкість у виробництві широкого спектра харчових продуктів.

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

РОЗДІЛ 2

АВТОМАТИЗАЦІЯ ТА КОНТРОЛЬ СИСТЕМИ ЕКСТРУЗІЇ

2.1 Змінні параметри у процесу екструзії

Контроль змінних процесу екструзії є важливим для забезпечення виготовлення успішного продукту. Важливо розуміти, які змінні процесу можна контролювати безпосередньо, а які змінні є результатом того, що контролюється в системі. Змінні процесу екструзії можна поділити на дві категорії: незалежні змінні та залежні змінні. Взаємодія змінних процесу екструзії має велике значення для оператора екструдера. Зміна незалежних змінних може призвести до зміни характеристик кінцевого продукту.

Незалежними змінними є параметри процесу, які оператор екструдера може безпосередньо контролювати з панелі керування. Змінні системи будуть різнитися в залежності від операційної системи. До незалежних змінних належать: швидкість подачі сухої сировини, вода та пара, що в екструдер, конфігурація екструдера, швидкість гвинта екструдера, нагрівання циліндра екструдера або температура теплової рідини та конфігурація форми [1, 2, 11]. Залежні змінні – це параметри процесу, які змінюються в результаті зміни одного або кількох незалежних змінних. До залежних змінних належать: час утримання, вологість та температура, час утримання в екструдерах, вологість в екструдері, температура в екструдері, тиск в екструдері та механічна енергія, внесена в екструдер.

Оптимізація змінних процесу машини та інгредієнтів є передумовами стабільності екструзійної системи, продуктивності та якості продукту. Основні незалежні змінні процесу, до яких належать швидкість подачі, вологість у циліндрі, швидкість шнека та температурний профіль циліндра, безпосередньо контролюються оператором екструдера. Здійснемо огляд змінних системи для контролю процесу харчової екструзії [1].

1. Подача. Як правило, продуктивність екструдера перевищує швидкість подачі матеріалу в нього. Першим важливим фактором у роботі екструдера є стабільний, постійний потік сировини у процес екструзії. Нестабільні швидкості подачі сировини часто призводять до нестабільного потоку продукту. Продукт, наприклад, матиме великий розподіл за розміром, погану форму та різні текстури.

2. Вологість. Вологість є критичним каталізатором у процесах екструзійної обробки. Волога у вигляді пари або води, введена в бочку екструдера, додає додаткову енергію для процесу приготування. Це збільшує продуктивність і зменшує потребу у великих приводних моторах. Зі збільшенням вологості зменшується необхідна механічна енергія. Волога діє як

					ННІЕТ КНУ.133.ГМБ-22.2026.ПЗ								
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	Удосконалення шнекового екструдера на основі засобів автоматизації				Літ.	Арк.	Аркуші		
Розроб.	Паршуков												
Перевір.	Цвіркун											18	20
									ННІЕТ КНУ Кафедра ЗІДО				
Н. Контр.	Омельченко												
Затверд.	Цвіркун												

змазка і тертя значно зменшується.

3. Швидкість гвинта. Швидкість гвинта безпосередньо впливає на ступінь заповнення циліндра, а отже, на час перебування, розподіл і зусилля зсуву на матеріал, що екструдуються. Швидкість гвинта є фактором, який визначає максимальний об'ємний вихід екструдера, тому виробники екструдерів проектувати машини так, щоб вони працювали на максимальних швидкостях від 400 до 500 об/хв.

Недоліком роботи екструдера на високих швидкостях є підвищений знос гвинтів та циліндра. Більшість інгредієнтів, які використовуються при екструзії продуктів харчування, є тиксотропними або псевдопластичними, тому існує лінійний зв'язок між швидкістю та обертальним моментом/тиском. Обертальний момент і тиск у відтоку змінюються зі швидкістю гвинта. Заповнення бочки є фактором, що впливає на стабільність продукту. Довжина заповнення бочки зменшується зі збільшенням швидкості гвинта та площі матриці, але збільшується зі швидкістю подачі [15-17]. Для підтримки стабільності екструдера необхідно знайти баланс між швидкістю подачі, площею матриці та швидкістю гвинта. Швидкість гвинта, швидкість подачі матеріалу та геометрія матриці потребують оптимізації для кожної рецептури продукту. Нормальний мінімальний діапазон швидкості гвинта становить 70-100 об/хв. Нижче цього діапазону об'ємна продуктивність буде обмежена, що зробить виробництво екструдованого продукту дорогим. Звичайною причиною роботи на низькій швидкості є досягнення максимальної тривалості перебування сировини в екструдері. Існують більш дешеві методи збільшення часу перебування, наприклад, попередня обробка матеріалів перед екструзією, наприклад, попереднє кондиціонування.

4. Температура циліндра та теплообмін. Екструдери можна класифікувати термодинамічно за розвитком тиску або за інтенсивністю зсуву. Екструдери генерують власне тепло за рахунок механічного перетворення, при цьому не відбувається непрямого нагрівання або охолодження циліндра. Ізотермічні екструдери працюють із охолодженням для видалення тепла з циліндра, що виникає внаслідок механічної енергії, або з нагріванням для підтримки температури продукту всередині циліндра [1]. Більшість екструдерів працюють з контролем температури, а ступінь непрямого нагрівання або охолодження залежить від продукту, що екструдуються. Швидкість теплопередачі визначається площею поверхні, різницею температур між граничним шаром матеріалу та металевим циліндром, а також коефіцієнтами теплопередачі різних матеріалів. Результат змін, внесених у незалежні змінні, що впливають на залежні змінні, закладено у кінцевому продукті екструдату. Таким чином, характеристики кінцевого продукту є показниками якості кінцевого продукту. Зміна певних змінних може контролювати характеристики кінцевого продукту. Деякі з цих характеристик включають [15]:

- вологість – стабільність;
- розширення – об'ємна щільність, розмір і форма;
- розчинність – липкість;
- всмоктування – вода, жир, молоко;

					ННІЕТ КНУ.133.ГМБ-22.2026.ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		19

- текстура – структура клітин;
- колір – світлий, темний;
- смак – сильний, м'який, солодкий.

Усі згадані вище характеристики продукту безпосередньо залежать від чотирьох критичних параметрів обробки. Вплив критичних параметрів і їх вплив на сировину визначає характеристики кінцевого продукту. Зміна незалежних змінних безпосередньо змінює взаємодію цих критичних параметрів. Чотири критичні параметри такі: волога, механічна енергія, теплова енергія, час утримання [1, 10, 17]. Щоб підтримувати стабільне відтворення кінцевого продукту всі критичні параметри повинні бути контрольованими та залишатися постійними. Вологість є критичним каталізатором у процесі екструзії. Механічна енергія є функцією вимірюваного крутного моменту гвинта та масового потоку і показує, скільки енергії використовується для екструджування сировини. Внесення теплової енергії є показником того, скільки енергії додається в систему у вигляді тепла для приготування сировини. Теплова енергія може додаватися у вигляді теплових рідин або нагрівальних елементів. Час утримання є прямим показником того, як довго сировина перебуває в циліндрі до його вивантаження через насадку.

2.2 Автоматизований контроль процесу екструзії

Підтримання стабільного виходу продукції та характеристик кінцевого продукту має велике значення в екструзійній промисловості. Часто неможливо проводити вимірювання якості в режимі онлайн. Щоб забезпечити таку якість, необхідно впровадити певний рівень автоматизації та контролю для управління критичними параметрами [1-2]. Застосування сучасних методів контролю до екструзії харчових продуктів є ефективним способом покращення виробництва. Виробництво високоякісних продуктів є необхідним у харчовій промисловості і можливе лише шляхом впровадження доступної системи контролю. Ефективна автоматизація та контроль системи екструзії усувають потенційну можливість людської помилки та можуть покращити оптимізацію процесу. Оптимізація процесу екструзії передбачає постійний зворотний зв'язок параметрів роботи та точне налаштування параметрів для виробництва високоякісної продукції. Автоматичні послідовності запуску та зупинки можуть мінімізувати втрати сировини та забивання. Система управління допомагає оператору та полегшує роботу для тих хто не має досвіду у процесах екструзії.

Система керування – це взаємозв'язок компонентів, що формують конфігурацію системи, яка забезпечує бажану реакцію або вихід системи. Автоматичне керування процесами передбачає контроль і регулювання робочих параметрів для роботи на заздалегідь встановлених значеннях [1-2]. Робочі параметри можна контролювати лише у разі наявності постійного зворотного зв'язку з оператором системи. Така система називається системою керування з замкнутим контуром зворотного зв'язку. Системи керування можна визначити як пристрої, які регулюють потік енергії, речовини або інших ресурсів. Їхнє розташування, складність та зовнішній вигляд змінюються залежно від їхнього

					ННІЕТ КНУ.133.ГМБ-22.2026.ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		20

призначення та функції. Загалом системи керування можна класифікувати як системи з відкритим або замкненим контуром. Відмінною ознакою між цими двома типами систем керування є використання порівняння зворотного зв'язку для роботи по замкнутому контуру.

1. Система керування з замкненим контуром. Система з замкненим контуром використовує вимірювання вихідного сигналу в порівнянні з бажаним виходом для генерації сигналу помилки, який подається на контролер. Системи управління з замкненим контуром за своєю природою є динамічними. Через це їх робота зазвичай визначається як за перехідною характеристикою так і за режимом сталого стану. Система керування з замкнутим контуром використовує вимірювання виходу і порівнює його з бажаною реакцією на вихід.

2. Іншою формою системи управління є система управління з розімкненим контуром. Системи керування з розімкненим контуром представляють собою найпростіший тип пристроїв керування. Система керування називається системою з розімкненим контуром, коли керуючий вхід застосовується без будь-яких відомостей про вихід об'єкта. Система з розімкненим контуром працює без зворотного зв'язку та безпосередньо формує вихід відповідно до вхідного сигналу [9-11]. Тому керування з розімкненим контуром дуже складно застосовувати в промислових системах. Система управління з розімкненим контуром – це система без зворотного зв'язку. Таку систему можна назвати компенсованою системою управління. Поширеним прикладом системи з розімкненим контуром є електричний тостер, який використовується на кухні.

Щоб зрозуміти систему керування, необхідно проаналізувати окремі компоненти, які є її складниками. Основні елементи складаються з термopарі або датчика, контролера, який обчислює різницю між фактичним виходом (зчитування з датчика) і бажаним виходом (задане значення), а потім регулює кінцевий контрольний елемент (нагрівальний елемент) для корекції виходу. Основні елементи виконують дуже важливу функцію в системі керування, тому вони повинні бути надійними, стабільними та ефективними [1, 17]. Первинні елементи – це прилади, що використовуються для вимірювання керованих змінних у процесі, таких як температура, тиск, оберти електродвигуна та надають зворотний зв'язок контролеру. Первинні елементи відіграють дуже важливу роль у системі управління, тому вони мають бути надійними, послідовними та ефективними. До первинних елементів належать [2]:

- вимірювання температури;
- вимірювання тиску;
- вимірювання витрати;
- прилади для аналізу якості.

Вимірювання температури. Найбільш поширені елементи, що використовуються такі, як біметалеві термостати. Пара різнорідних металів із різними коефіцієнтами лінійного теплового розширення з'єднується разом. Під впливом одного й того ж підвищення температури відбувається диференційне розширення, через що композитна планка вигинається. Біметалева планка, у

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

свою чергу, вмикає або вимикає контрольний пристрій залежно від температури. Діапазон температур для біметалевих термостатів становить від 0°C до 400°C з точністю $\pm 5\%$. Приклад біметалевого термостата можна побачити на рисунку 2.1.

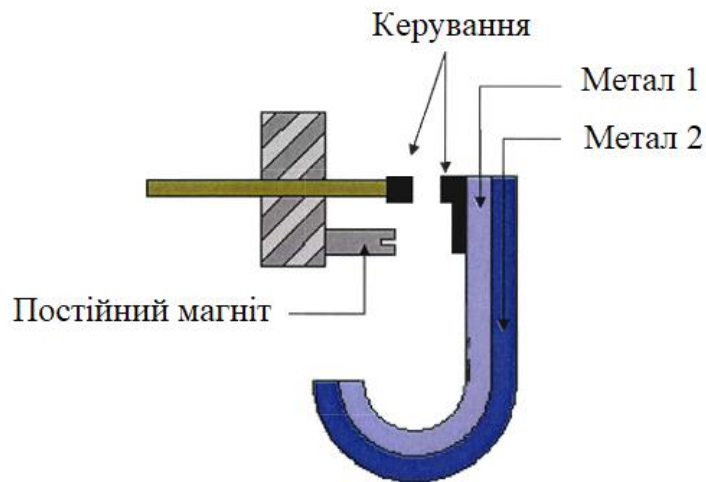


Рисунок 2.1 – Біметалічний термостат

Термопари. Коли два різні метали дроти або дроти зі сплавів з'єднуються для утворення замкнутого кола, різниця температур на стику порівняно з кінцями викликає електрорушійну силу. Величина генерованої електрорушійної сили залежить від типів використаних матеріалів та різниці температур між металевими дротами та стиком. Якщо еталонний або холодний сполучний вузол підтримується на постійному або відомому значенні, а характеристики термопари відомі, величина генерованої електрорушійної сили буде показником температури стику [1, 2, 9, 15]. Датчики термометрів опору виготовляються з металу або напівпровідникових матеріалів. Датчики температури мають стабільну та високо лінійну залежність опору від температури. Вони характеризуються значно вищою точністю, кращою лінійністю та стабільністю порівняно з термопарами. Однак мають нижчий максимальний температурний поріг і повільніший час відгуку без термічної ванни. Датчик термопари поміщено у захисний тепловий футляр. Тепловий футляр зазвичай виготовляється з металу або кераміки, залежно від застосування, і заповнений провідним матеріалом.

Контролери. Метою контролера в регуляторному управлінні є підтримання керованої величини на заздалегідь визначеній встановленій точці. Оператор визначає встановлену точку та вводить значення у контролер. Контролер керує встановленою точкою, інтерпретуючи зворотний зв'язок від первинних елементів, а потім виводить коригувальні дії до кінцевих елементів управління, щоб підтримувати встановлену точку [1, 9-11]. Існують різні методи керування або алгоритми, що використовуються в контролерах у петлях зворотного зв'язку. Ці методи керування спрямовані на покращення системи керування, шляхом зменшення зсуву або підвищення стабільності. Обрана форма керування повинна відповідати застосуванню і бути максимально

					ННІЕТ КНУ.133.ГМБ-22.2026.ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		22

простою для того, щоб стабільно досягати бажаних результатів.

Кінцеві органи керування. Кінцевий орган керування можна визначити як пристрій, який отримує інструкції від контролера та змінює стан системи керування для досягнення або підтримання бажаної установчої точки. У процесі екструзії є багато кінцевих органів керування, які можуть бути використані для контролю системи. Ці кінцеві органи керування можуть включати: привод змінної швидкості, поєднаний з мотором; дозувальні насоси; та нагрівальні елементи. Електронний привод змінної частоти забезпечує живлення із змінною напругою та частотою, що дозволяє точно керувати швидкістю та струмом двигуна [1, 2]. Приводи змінної частоти також можуть називатися приводами з регульованою швидкістю, інверторами або частотними перетворювачами. Дозуючі насоси є об'ємними насосами і зазвичай використовуються для точного дозування або подачі певної кількості рідини в систему. Вони широко застосовуються в екструзійній промисловості для дозування води, барвників тощо.

Система керування складається з взаємопов'язаних компонентів, які можна поділити на елементи вимірювання, контролери та кінцеві елементи керування. Існують різні режими керування, які можна впровадити для покращення системи керування, зменшення відхилення та підвищення стабільності. Метод керування повинен відповідати застосуванню та бути якомога простішим, щоб постійно досягати бажаних результатів. Процес потрібно зрозуміти, перш ніж ним керувати. Система керування повинна бути надійною та ефективною.

2.3 Реалізація автоматизованої системи управління екструдером

Екструдер є дуже важливою машиною в харчовій промисловості. Основні компоненти екструдера: бункер, з якого подається сировина для екструзії, циліндрична камера, зазвичай з електричним нагріванням, обертовий гвинт та фільтр на протилежному кінці для формування екструзійної маси. Кожен компонент процесу екструзії буде розглянуто з точки зору його функції, конструкції та впровадження в систему керування.

1. Бункер для подачі. Попередньо змішана сировина подається за допомогою шнекового конвеєра у бункер або резервуар для зберігання. Під час процесу екструзії сировина виводиться з резервуара за допомогою шнека з регульованою швидкістю подавання. Харчовий матеріал проходить через додаткове обладнання у двошнековий харчовий екструдер, де сировина замішується, нагрівається та видавлюється через форму [1, 2, 15]. Екструдери зазвичай працюють із недостатньою подачею матеріалу, що означає, що транспортувальна здатність екструдера перевищує швидкість подачі матеріалу в нього. Першим важливим фактором у процесі екструзії є стабільне та постійне введення сировини в екструдер.

Резервуар для сировини забезпечує буфер сировини на вході, щоб екструдер міг працювати безперервно. Резервуар має бути здатним обробляти

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

достатню кількість сировини, а також спроектованим для рівномірного її видавлювання. Бункер – це контейнер, який використовується для введення сировини в екструдер. Бункер, живильний жолоб і вхідна насадка повинні бути ідеально зібрані та спроектовані таким чином, щоб забезпечувати постійний потік сировини, що легше досягається за допомогою бункерів круглої форми, хоча вони дорожчі і складніші в конструкції, ніж прямокутної форми. Їх проєктують з об'ємом, що дозволяє вмістити матеріал на 2 години роботи [1-2]. При проєктуванні бункера для подачі або будь-якого іншого бункера, найскладнішим завданням є подолання утворення, яке сприяє тому, що сировина перестає самоплинно спускатися до шнека через взаємне взаємозамикання частинок матеріалу [13]. Ймовірно, двома найпопулярнішими пристроями для подолання цього є змішувач або вібраційний пристрій. Процес подачі визначають, який метод можна застосувати в бункері. Тому при проєктуванні бункера дуже важливо перевірити характеристики потоку оброблюваної сировини.

Транспортування твердих речовин у бункері, як правило, відбувається за рахунок гравітаційного потоку частинок. Матеріал рухається до нижньої частини бункера під дією власної ваги. Може виникати масовий потік при якому немає застійних зон і вся сировина рухається до виходу або воронкоподібний потік, при якому матеріал, що знаходиться ближче до стінок бункера, застоюється. Деякі матеріали, що мають дуже поганий потік у твердому стані, можуть застрягати в горловині екструдера, що призводить до проблеми, яка називається утворенням «містка» або «арки». Як характеристики матеріалу так і конструкція бункера впливають на транспортування твердих речовин у цій частині машини [1, 2]. Краще використовувати бункер з круглою секцією, ніж бункер з квадратною або прямокутною секцією, оскільки стискання, якому піддається матеріал, буде різним у деяких зонах залежно від форми бункера. Бункери з круглою секцією здійснюють поступовий тиск на матеріал, тоді як бункери з квадратною секцією створюють нерівномірний тиск, що може призвести до зупинки матеріалу. Крім того, можна вжити такі заходи, як додати вібраційну систему, яка допомагає усунути утворений місток, або встановити змішувачі, щоб уникнути осідання та ущільнення матеріалу. Характеристики матеріалу, що впливають на транспортування твердого матеріалу в бункері є [13]:

- питомий об'єм – це щільність матеріалу з урахуванням повітря, що знаходиться між його частинками. Питомий об'єм матеріалу завжди буде меншим за реальну щільність. Якщо питомий об'єм матеріалу надто низький (не більше 20–30% від реальної щільності), матеріал створюватиме проблеми з течією, оскільки для досягнення певного потоку знадобиться подавати великий обсяг матеріалу. Легше працювати з матеріалами, питомий об'єм яких не надто низький (близько 60% від реальної щільності).

- стиснення – це збільшення об'ємної щільності сировини при його стисненні. Цікавлять матеріали з низьким коефіцієнтом стисливості, тобто ті, що зазнають невеликої зміни об'ємної щільності при прикладанні тиску;

- коефіцієнт тертя, який можна розрізняти внутрішній коефіцієнт тертя,

					ННІЕТ КНУ.133.ГМБ-22.2026.ПЗ	Арк.
						24
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

який виникає між частинками самої сировини та зовнішній коефіцієнт тертя, який існує між частинками сировини та поверхнею циліндра, з якою вона контактує. Для забезпечення належного потоку у бункері бажано, щоб обидва коефіцієнти були низькими;

– розподіл розмірів гранул – бажано, щоб він був максимально однорідним, щоб уникнути проблем з плинністю гранул, бо частинки будуть прагнути до ущільнення, що ускладнить їх потік у бункері.

Оскільки екструзія є безперервним процесом, найважливішою конструктивною вимогою цього конкретного режиму роботи є забезпечення рівномірної стабільної гравіметричної подачі до $\pm 2\%$ від бажаного значення та уникнення поганого потоку у твердому стані, що може призвести до утворення «містка» або «арки» [1, 2, 13]. Тому іноді для забезпечення постійного потоку матеріалу використовують вібраційні пристрої, мішалки та навіть гвинти. Гвинт має бути спроектований таким чином, щоб бункер можна було швидко заповнити, забезпечуючи безперервний запас сировини (рис. 2.2).

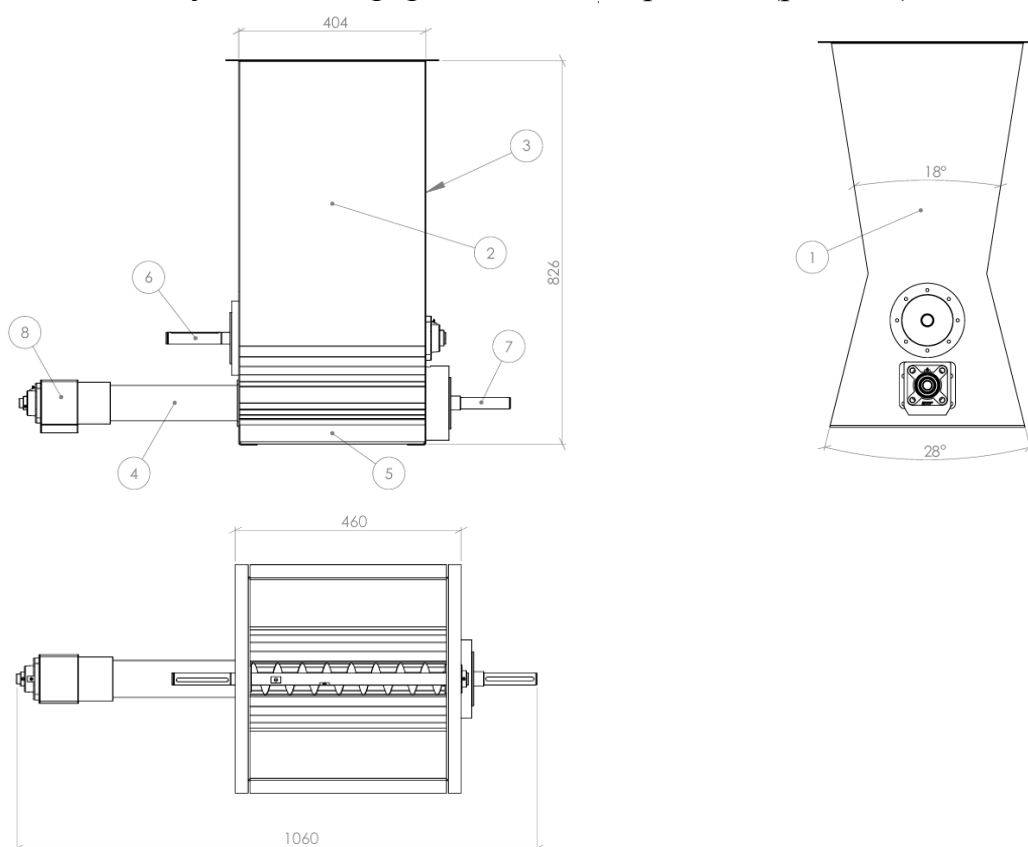


Рисунок 2.2 – Бункер для подачі сировини

Запропоновано на дні бункера встановити змінний гвинтовий дозатор, щоб забезпечити рівномірну подачу сировини з будь-якою бажаною швидкістю. В середині бункера, безпосередньо над гвинтовим дозатором встановлений повітряний клапан, задля уникнення поганого потоку сипкої сировини, що може призвести до утворення «містка» або «арки». Клапан підключено до компресора, який має подавати стиснене повітря в бункер з проміжною швидкістю, яку контролює система ПЛК, щоб запобігти утворенню тунелів і пустот у сировині. Шнек контролюється за допомогою перемикача на панелі управління, де оператор може вручну вмикати або вимикати шнек коли

необхідно подавати сировину в бункер. Під час роботи в автоматичному режимі всі необхідні компоненти для функціонування системи керування повинні контролюватися автоматично.

2. Екструдер складається з різних компонентів, які включають: редуктор, дозуючий насос, циліндр і шнеки, нагрівальні елементи, термопари, а також матрицю та різак.

2.1. Барабан екструдера – це трубоподібний корпус, у якому обертаються шнеки. Коли матеріал подається в екструдер через завантажувальний отвір, два взаємозамкнені шнеки транспортують матеріал вперед через барабан. Барабан складається з сегментів, які з'єднуються болтами, утворюючи цей трубоподібний корпус.

Циліндр екструдера містить гвинт всередині, а нагрівач та інші компоненти розташовані зовні. У зоні подачі встановлено бункер для запобігання передчасного нагрівання сировини. Уздовж всієї довжини циліндра екструдера нанесено шар захисного матеріалу для запобігання теплових втрат на вході. Для кожного відділу стінки циліндра може бути кілька зон нагрівальних стрічок. Зміни температури в кожній зоні визначаються за допомогою датчика, встановленого під циліндром. Існують два типи нагрівачів для циліндрів: стрічкові та литі [12]. Стрічкові використовуються для нагрівання, тоді як литі мають канали для пропуску охолоджуючого середовища, тому їх можна використовувати як для нагрівання, так і для охолодження. Охолоджуючим середовищем зазвичай є вода, але іноді може використовуватися олія для запобігання тепловому удару циліндра. Оскільки циліндр екструдера є основним компонентом, де обробляється сировина його розробляють достатньо великим, щоб вмістити максимальну можливу кількість матеріалу, а також так, щоб гвинт не дряпав стінки циліндра, що може призвести до пошкодження стінки циліндра.

2.2. Гвинт або шнек складається з довгого циліндра, оточеного спіральною різьбою. Гвинт є однією з найважливіших частин, оскільки він сприяє виконанню функцій транспортування, нагрівання та змішування сировини. Гвинти розташовані всередині корпусу гвинта екструдера, який є частиною циліндра. Гвинти екструдера складаються з численних ділянок різьби, які об'єднуються для формування сегментів гвинта. Крок гвинтів становить 54 мм, що робить кожен сегмент довжиною 108 мм та діаметром 50 мм. Сегменти ковзають по валу та утримуються на місці за допомогою шпонки та шпонкового пазу. На кінці кожного валу для фіксації сегментів разом використовується болт [12]. Оператору доступна безліч конфігурацій гвинтів, але звичайною практикою є налаштування гвинта як серії повторюваних елементів подачі та змішування. Гвинти подачі створюють тиск, необхідний для проходження матеріалу через обмеження змішування, що призводять до біохімічних перетворень. Ступінь заповнення циліндра не можна побачити візуально, але інформація, така як моменти обертання та перепади тиску, надає симптоми для діагностичних цілей. Вимірювання кількості заповнених гвинтів та їх заповнення дають уявлення про віскозно-еластичні властивості матеріалу, що екструдується.

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

Вибір конструкції гвинта та його розташування в циліндрі визначався з урахуванням наступних факторів [1-2]:

- вимог до об'ємного потоку;
- відповідності ефективності насоса реології матеріалу, що екструдуються;
- міцнісних та зносостійких характеристик; площі поверхні для теплообміну та вузького розподілу часу опору;
- розподілу тиску та потоку на вході у форму;
- ступеня зсуву або інтенсивного змішування; ступеня заповнення циліндра та розміру двигуна.

Гвинт екструдера є одним із найважливіших компонентів машини та його конструкція має вирішальне значення для змішування та оброблюваності сировини, яка підлягає обробці. Гвинт поділяється на п'ять різних секцій, які називають зонами. Різні типи сировини можуть вимагати різних конструкцій гвинтів, а деякі конструкції можуть не мати всієї зони. У більшості гвинтів зазвичай виділяють три зони, які є:

Зона подачі є точкою, де сировина потрапляє в екструдер. У цій зоні ширина лопатей однакова, а відстань між каналами зазвичай однакова по всій зоні. Зона стискання, де починається деформація сировини, а саме коли гвинт обертається, все більше і більше сировини нагрівається і глибина каналу поступово зменшується. Зона дозування у якій глибина каналу знову залишається сталою по всій зоні, відбувається нагрівання останніх частинок і змішування сировини до рівномірної температури і складу. Тут нагрівачі барабана можуть додавати необхідну енергію для завершення процесу екструзії.

Під час процесу переміщення у бункер подається вода та змішується з матеріалом. Нагрівальні елементи готують матеріал під час переміщення, тоді як термопари контролюють заздалегідь встановлену температуру для процесу. Коли нагріта сировина досягає передньої частини бункера екструдера, гвинти проштовхують матеріал через фільтру у заздалегідь визначені форми, де екструдований продукт потім розрізається на потрібні довжини [1]. Продукт може бути переданий на фінальну обробку, де його висушують, покривають барвниками або упаковують, залежно від процесу. Під час процесу екструзії оператор постійно контролює кінцевий продукт та змінює встановлені параметри для досягнення потрібної якості. Параметри включають, наприклад, швидкість подачі сировини в екструдер, швидкість обертання гвинта екструдеру, температура циліндра, подача води та швидкість різачка.

Необхідне тепло може надходити як шляхом теплопровідності від гарячої поверхні циліндра так і внаслідок в'язкого нагріву (зсуву) через сильні зсуви. Потік тепла за рахунок в'язкого нагріву збільшується зі збільшенням швидкості гвинта. Проте в цьому випадку внесок теплопередачі шляхом теплопровідності у плавлення зменшиться, оскільки зросте витрата, а отже, зменшиться час перебування матеріалу в екструдері [13]. З іншого боку, підвищення температури циліндра зазвичай означає збільшення теплового потоку за рахунок теплопровідності і, отже, збільшення швидкості деформації але з

					ННІЕТ КНУ.133.ГМБ-22.2026.ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		27

іншого боку, підвищення температури зменшить в'язкість матеріалу і, відповідно, зменшить генерацію тепла за рахунок в'язкого нагріву, тож деяка сировини, в'язкість якої дуже чутлива до температури, може зазнати зниження швидкості наріва. Довжина стиснення сировини залежно від температури циліндра при постійній швидкості гвинта. Довжина стиснення зменшується (і, отже, збільшується швидкість нагрівання) при підвищенні температури циліндра до певного моменту, після якого довжина стиснення збільшується через зменшення кількості тепла, що утворюється в результаті в'язкого нагріву.

Двигун потужністю 32 кВт приводить у рух редуктор, який з'єднаний зі шнеками екструдера. Двигун підключений до перетворювача частоти та конфігурації ПЛК. Шнеки екструдера керуються через операційну систему ПЛК, де оператор вводить заздалегідь визначену задану величину в систему керування задля збільшення або зменшення частоти двигуна. Коли частота двигуна збільшується, сировина подається швидше через екструдер, а при зменшенні частоти на сенсорній панелі відбувається протилежне.

2.3. Нагрівальні елементи та датчики температури. Циліндр зазвичай має системи теплопередачі. Нагрів можна здійснювати за допомогою електричних нагрівників, розташованих по всій його довжині. Циліндр зазвичай поділяють на кілька зон нагріву, принаймні на три, з незалежним контролем у кожній з них, що дозволяє отримати розумний температурний градієнт від бункера до насадки [13]. Циліндр потрібно охолоджувати, якщо внаслідок внутрішнього виділення тепла, перевищується номінальна температура процесу. Охолодження в меншості випадків здійснюється за допомогою рідин, оскільки хоча вони мають більшу здатність видаляти тепло, ніж повітря, температура важче контролюється. Датчики контролю температури розташовані в циліндрі, тому температура матеріалу завжди буде вищою за ту, яку показують контролери.

Багато екструдерів працюють з контролем температури і ступінь непрямого нагрівання або охолодження залежить від режиму роботи екструдера. Різниці тисків і зсувні сили впливають на швидкість реакцій і створюють тертя. Нагрів бочки також створює провідникове та конвективне тепло в заповнених та частково заповнених зонах і частка кожного джерела тепла залежить від фізичних та реологічних властивостей сировини та профілю температури бочки [1-2]. У цьому випадку джерелом тепла служать електричні нагрівальні елементи. Три пари нагрівальних картриджів закріплені болтами на бочці. Картриджі складаються з чотирьох електричних нагрівальних елементів, які генерують приблизно 3 кВт тепла на кожен картридж. У корпусі бочки у центрі кожного нагрівального картриджа виконані отвори, у яких встановлені термопари типу J для вимірювання температури бочки. Сумарна потужність електричних елементів становить приблизно 18 кВт.

Нагрівальні елементи мають керований температурний діапазон приблизно від 50°C до 250°C і управляються системою керування ПЛК. Контроль температури екструдера базується на системі керування з замкненим контуром з двопозиційним регулюванням, де нагрівальний елемент виступає кінцевим регулювальним елементом, а термопари – як зворотний зв'язок

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

температури для системи керування ПЛК [1-2]. Оператор вводить бажану точку температури для кожної зони нагрівання в систему керування ПЛК і вмикає нагрівальні елементи через сенсорну панель. ПЛК отримує встановлені точки температури для зон нагрівання. Коли нагрівальні елементи увімкнені тоді нагрівається циліндр екструдера, а термопари постійно вимірюють фактичну температуру циліндра. Контролер порівнює вхідне значення від оператора та сигнал зворотного зв'язку від термопари. Якщо виміряна температура перевищує задану точку налаштування відповідної зони нагріву, контролер вмикає внутрішній лічильник і через модуль вмикає зону нагріву після зупинки лічильника.

2.4. Матриця екструдера розташована на кінці циліндра. Головна її мета полягає в тому, щоб надати обробленому матеріалу бажану форму. Конструкція форми, наприклад, кількість отворів і їх форма, впливає на тиск у циліндрі екструдера. Розмір отворів може варіюватися від великих отворів діаметром 50 мм до малих отворів розміром з головку шпильки [1]. Розмір матриці дуже важливий і безпосередньо пов'язаний із тиском у матриці. Наприклад, при виробництві розширених снєків отвір у матриці не повинен бути занадто великим. Якщо він буде занадто великим, тиск у матриці не буде достатньо високим, щоб створити різницю тисків між внутрішнім тиском екструдера та атмосферним тиском, необхідну для того, щоб продукт розширився, якщо його нормалізувати. Якщо отвір у матриці занадто малий, такі продукти, як висівки, можуть забивати отвір і зупиняти шнеки екструдера.

4. Різак розташований на стороні вивантаження продукту зі штампу. Метою різка є нарізка екструдованого матеріалу на бажані довжини під час його виходу з матриці. Змінюючи швидкість різка, продукт можна розрізати на різні довжини. Різак складається з одного або декількох лез, що обертаються над вихідними отворами матриці. Леза проходять якомога ближче до поверхні матриці, щоб забезпечити ефективне відрізання продукту. Різальний вузол можна обертати над формуючим вузлом, щойно екструдований матеріал досягне бажаної текстури та форми [1, 2, 11]. Двигун потужністю 0,55 кВт приводить у дію ріжучий механізм, який розташований на стороні вивантаження продукту з прес-форми екструдера перед формою. Двигун підключено до приводу змінної швидкості та конфігурації ПЛК задля змінної швидкості для збільшення або зменшення частоти двигуна. Коли частота збільшується, швидкість різка зростає і екструдований продукт нарізається на коротші відрізки. Коли частота зменшується, швидкість різка зменшується і різак розрізає екструдований продукт на довші відрізки.

Реалізація автоматизованої системи управління екструдером для забезпечення підтримки параметрів у заданих діапазонах таких як швидкість обертання шнека або налаштування нагріву наведена на рисунку 2.3.

Система управління екструдером має такі основні компоненти:

1. Основні компоненти системи екструдера: система подачі.

1.1. Система подачі. Запропоновано на дні бункера встановити змінний гвинтовий дозатор, щоб забезпечити рівномірну подачу сировини з будь-якою бажаною швидкістю. Всередині бункера, безпосередньо над гвинтовим

					ННІЕТ КНУ.133.ГМБ-22.2026.ПЗ	Арк.
						29
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

дозатором встановлений повітряний клапан, задля уникнення поганого потоку сипкої сировини, що може призвести до утворення «містка» або «арки». Клапан підключено до компресора, який має подавати стиснене повітря в бункер з проміжною швидкістю, яку контролює система ПЛК, щоб запобігти утворенню тунелів і пустот у сировині. Шнек контролюється за допомогою перемикача на панелі управління, де оператор може вручну вмикати або вимикати шнек коли необхідно подавати сировину в бункер.

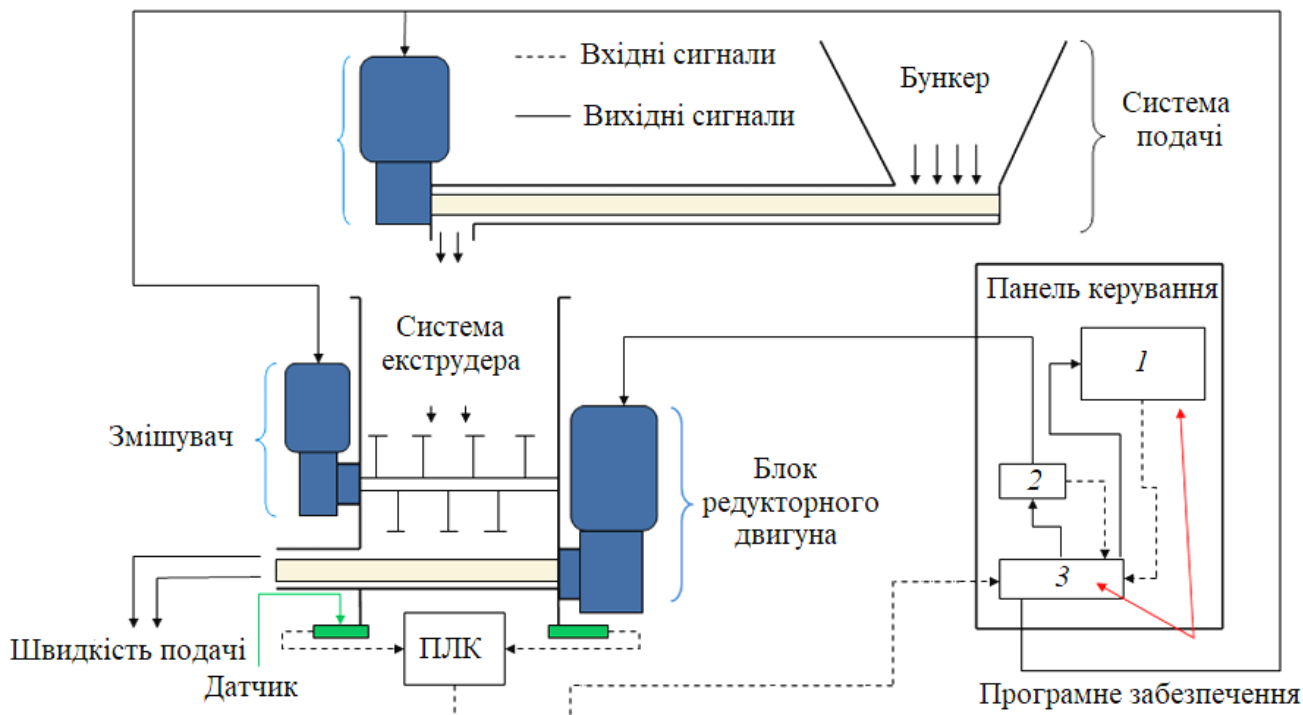


Рисунок 2.3 – Автоматизована система управління екструдером

1.2. Система екструдера: шнек, нагрівальні елементи, різучі елементи.

Шнек. Двигун потужністю 32 кВт приводить у рух редуктор, який з'єднаний зі шнеками екструдера. Двигун підключений до перетворювача частоти та конфігурації ПЛК. Шнеки екструдера керуються через операційну систему ПЛК, де оператор вводить заздалегідь визначену задану величину в систему керування задля збільшення або зменшення частоти двигуна. Коли частота двигуна збільшується, сировина подається швидше через екструдер, а при зменшенні частоти на сенсорній панелі відбувається протилежне.

Нагрівальні елементи. Мають керований температурний діапазон приблизно від 50°C до 250°C і управляються системою керування ПЛК. Контроль температури екструдера базується на системі керування з замкненим контуром з двопозиційним регулюванням, де нагрівальний елемент виступає кінцевим регулювальним елементом, а термопари – як зворотний зв'язок температури для системи керування ПЛК. Оператор вводить бажану точку температури для кожної зони нагрівання в систему керування ПЛК і вмикає нагрівальні елементи через сенсорну панель. ПЛК отримує встановлені точки

температури для зон нагрівання. Коли нагрівальні елементи увімкнені тоді нагрівається циліндр екструдера, а термопари постійно вимірюють фактичну температуру циліндра. Контролер порівнює вхідне значення від оператора та сигнал зворотного зв'язку від термопари. Якщо виміряна температура перевищує задану точку налаштування відповідної зони нагріву, контролер вмикає внутрішній лічильник і через модуль вмикає зону нагріву після зупинки лічильника.

Різучі елементи. Двигун потужністю 0,55 кВт приводить у дію ріжучий механізм, який розташований на стороні вивантаження продукту з прес-форми екструдера перед формою. Двигун підключено до приводу змінної швидкості та конфігурації ПЛК задля змінної швидкості для збільшення або зменшення частоти двигуна. Коли частота збільшується, швидкість різача зростає і екструдований продукт нарізається на коротші відрізки. Коли частота зменшується, швидкість різача зменшується і різача розрізає екструдований продукт на довші відрізки.

2. Апаратне забезпечення системи керування: датчики, нагрівальні елементи та контролери. Контролери екструдера використовується для керування екструзійними машинами. Екструзійна машина повинна добре реагувати на зміни крутного моменту, зберігаючи стабільну швидкість для високих навантажень тертя. Проблема вирішується використанням високоякісного контролера [14]. Системи контролю процесом екструзії відіграє важливу роль, забезпечуючи безпеку продукції та підтримку стандарту якості. Ці системи складаються з кількох ключових компонентів, кожен з яких виконує важливу функцію у регулюванні операцій з переробки харчових продуктів. Перш за все, датчики є критично важливими елементами систем керування харчовою промисловістю. Вони відповідають за моніторинг різних параметрів, таких як температура, тиск, вологість і швидкість потоку. Завдяки безперервному збору даних у реальному часі з виробничого середовища сенсори дозволяють своєчасно вносити коригування системи, що допомагає забезпечити збереження умов обробки в межах визначених лімітів. Точність і надійність цих датчиків безпосередньо впливають на загальну ефективність системи керування.

Запропоновано систему екструдера розділити на три окремі зони: зону подачі (ЗП), зону нагріву (ЗН), зону дозування (ЗД). Встановити додаткові температурні датчики в перехідній зоні між зоною нагріву (ЗН) та зоною дозування (ЗД) задля дотримання прямого контакту з екструзією, що забезпечить контроль температури перед виходом сировини з матриці. Встановлення температурних датчиків ближче до сировини, а саме врівень з внутрішньою стінкою барабана уможливить підвищення точності вимірювання температури. Здійснено моделювання контролю температури під час екструзії в секції подачі, нагрівання та дозування.

Наступними за чергою йдуть контролери, які виконують роль компонентів прийняття рішень у системах контролю харчової промисловості. Вони отримують дані від сенсорів і обробляють ці дані для визначення необхідних дій. Контролери використовують алгоритми для порівняння

фактичних значень із попередньо встановленими цільовими значеннями, генеруючи керуючі сигнали, які направляють інші компоненти системи. Цей зворотний зв'язок є ключовим для підтримки оптимальних умов на всіх етапах харчової обробки.

Управління процесом екструзії в режимі реального часу за допомогою датчиків та автоматизованих систем для безперервного контролю та регулювання таких параметрів, як температура, тиск та розміри, забезпечуючи високу якість продукції та ефективність роботи в харчовій промисловості. Вона використовує датчики для відстеження критичних змінних, а саме температури, тиску та розмірів продукту, а система управління обробляє ці дані та вносить відповідні зміни до роботи обладнання. При екструзії невеликі відхилення можуть створити великі проблеми, наприклад, деформовані вироби. Контроль у реальному часі дозволяє вирішити ці проблеми, вносячи миттєві корективи.

3. Програмне забезпечення системи керування: програма користувача, графічний інтерфейс користувача. режим керування.

Інтерфейси людина-машина забезпечують важливий зв'язок між операторами та системою керування. Вони полегшують легкий моніторинг і контроль системи, дозволяючи користувачам візуалізувати дані в реальному часі та ефективно реагувати на системні сповіщення. Система відіграє значну роль у прийнятті рішень і вирішенні проблем, сприяючи безпечнішому та ефективнішому середовищу харчової обробки [14]. Взаємодія між датчиками, контролерами, виконавчими механізмами та інтерфейсом людина-машина є необхідним для безперебійної роботи систем керування харчовою промисловістю. Кожен компонент має функціонувати гармонійно для забезпечення безпеки, якості та ефективності у процесах виробництва продуктів харчування.

2.4 Система керування температурою в екструдері

Контроль температури в екструдері є критично важливим аспектом виробничого процесу, оскільки безпосередньо впливає на якість, продуктивність і ефективність виготовлених сировини. У процесі екструзії контроль температури відіграє вирішальну роль протягом усього процесу переробки. Під час таких етапів процесу, як змішування, гомогенізація, кондиціонування та вивантаження, температуру потрібно підвищувати або знижувати на різних ділянках, залежно від продукту та виробничого процесу. Контроль температури за допомогою теплоносіїв дає в цьому відношенні очевидні переваги. Окрім рівномірного розподілу температури, він має вирішальну перевагу, дозволяючи одночасно подавати та відводити тепло в одній і тій же зоні регулювання температури. Точний і швидкий контроль температури покращує структуру транспортованого матеріалу та сприяє досягненню оптимальної якості поверхні.

Контроль температури в екструзійній машині є надзвичайно важливим з кількох причин. По-перше, це впливає на в'язкість сировини, що екструдуються. Різні матеріали мають певні температурні діапазони, в межах яких вони

					ННІЕТ КНУ.133.ГМБ-22.2026.ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		32

демонструють оптимальну в'язкість для екструзії. Якщо температура занадто висока, матеріал може стати занадто тонким, що призводить до таких проблем, як провисання, нерівномірна товщина і погана стабільність розмірів. З іншого боку, якщо температура занадто низька, харчова сировина може бути надто товстою, що призводить до надмірного тиску на машину, підвищеного зношування обладнання та можливих засмічень [6]. По-друге, контроль температури впливає на хімічні та фізичні властивості екструдованого продукту. Наприклад, при екструзії полімеру температура може впливати на ступінь кристалізації, молекулярну орієнтацію та механічні властивості кінцевого продукту. Підтримання правильної температури гарантує, що продукт відповідає бажаним специфікаціям і стандартам якості. Правильний контроль температури може підвищити енергоефективність процесу екструзії. Оптимізуючи налаштування температури, можна зменшити споживання енергії машиною, що веде до більш стійкої роботи.

Фактори, що впливають на температуру в екструзійній машині [6]:

1. Властивості сировини. Різні матеріали мають різні теплові властивості, такі як питома теплоємність, теплопровідність і температура плавлення. Ці властивості визначають, як матеріал реагує на тепло і як швидко його можна нагрівати або охолоджувати.

2. Конструкція гвинта. Конструкція гвинта в екструзійній машині відіграє важливу роль у генерації та передачі тепла. Геометрія гвинта, глибина польоту можуть впливати на швидкість різання та нагрів тертя всередині машини.

3. Швидкість подачі. Швидкість подачі сировини в екструзійну машину також може впливати на температуру. Вища швидкість подачі може вимагати більше тепла для плавлення матеріалу, тоді як нижча швидкість подачі може призвести до перегріву, якщо не налаштувати відповідне тепло.

4. Нагрівання та охолодження ствола. Системи нагрівання та охолодження ствола екструзійної машини відповідають за підтримку бажаного температурного профілю. Тип і ефективність цих систем можуть впливати на точність контролю температури та час реакції.

5. Дизайн матриці. Конструкція матриці на кінці екструзійної машини може впливати на температуру екструдованого продукту. Штамп може виконувати функції теплообмінника, видаляючи тепло з продукту або додаючи до нього тепло, залежно від конструкції та умов експлуатації.

Існує кілька методів контролю температури в екструзійній машині. Методи можна загалом класифікувати на дві категорії: активний і пасивний контроль температури.

Активний контроль температури передбачає використання зовнішніх пристроїв для нагрівання або охолодження екструзійної машини. Найпоширеніші методи активного контролю температури включають [6]:

1. Нагрівання ствола. Ствол екструзійної машини зазвичай оснащений електричними нагрівачами або системами циркуляції гарячої олії для нагрівання матеріалу. Нагрівачі зазвичай поділяються на зони вздовж ствола, що дозволяє точно контролювати температуру. Температуру в кожній зоні можна регулювати незалежно для створення бажаного профілю температури.

					ННІЕТ КНУ.133.ГМБ-22.2026.ПЗ	Арк.
						33
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

2. Охолодження ствола. Окрім нагрівання, ствол може бути оснащений системами охолодження для видалення надлишкового тепла. Охолодження можна досягти за допомогою водяних охолоджувачів, повітряних або холодильних установок. Швидкість охолодження можна регулювати, щоб підтримувати температуру в бажаному діапазоні.

3. Охолодження гвинтом. Деякі екструзійні машини оснащені гвинтовими системами охолодження для запобігання перегріву гвинта. Охолодження гвинтом може зменшити нагрів тертя та покращити загальний контроль температури машини.

Пасивний контроль температури базується на вроджених теплових властивостях матеріалів та конструкції екструзійної машини для підтримки температури. Деякі приклади пасивних методів контролю температури включають [6]:

1. Ізоляція ствола та інших компонентів екструзійної машини може зменшити втрати тепла та підвищити енергоефективність. Ізоляційні матеріали, такі як керамічне волокно або мінеральна вата, можуть використовуватися для обгортання ствола та запобігання виходу тепла.

2. Оптимізуючи конструкцію гвинта, ми можемо зменшити нагрів тертя та покращити теплопередачу всередині машини. Цього можна досягти за допомогою гвинта з меншою глибиною польоту, більшим кроком або спеціальною обробкою поверхні для зменшення коефіцієнта тертя.

3. Вибір матеріалів із відповідними тепловими властивостями також може допомогти контролювати температуру. Наприклад, матеріали з високою теплопровідністю можуть ефективніше передавати тепло, зменшуючи потребу у перегріві або переохолодженні.

Для забезпечення ефективного контролю температури необхідно постійно контролювати температуру в екструзійній машині. Це можна зробити за допомогою датчиків температури, розташованих у різних місцях машини, таких як ствол, гвинт і матриця. Дані про температуру можна збирати та аналізувати в режимі реального часу для виявлення будь-яких відхилень від бажаного профілю температури [1-2, 6]. Системи керування зворотним зв'язком можуть використовуватися для регулювання налаштувань нагрівання та охолодження на основі вимірювань температури. Системи використовують контролер для порівняння фактичної температури з заданою точкою та внесення відповідних коригувань до нагрівальних або охолоджувальних пристроїв. Наприклад, якщо температура занадто висока, контролер може зменшити енергію для нагрівачів або збільшити швидкість охолодження.

Система регулювання температури з замкненим контуром наведено на рисунку 2.4. Бажаний вихідний сигнал – це задане значення, яке оператор вводить у систему керування. Коли нагрівальні елементи вмикаються, нагрівається бочка екструдера, а термopара виступає в ролі вимірювального елемента системи та вимірює фактичну температуру бочки.

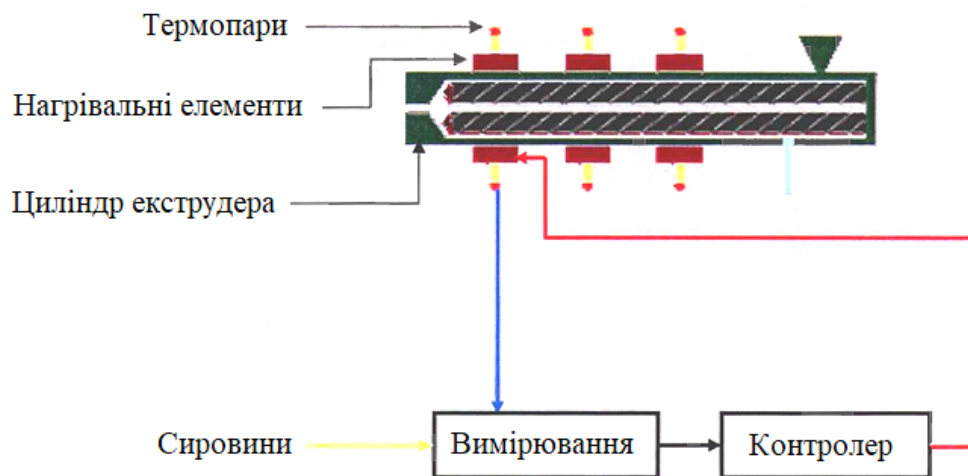


Рисунок 2.4 – Система керування температурою із замкнутим контуром

Вимірювач температури є зворотним зв'язком для контролера. Контролер порівнює вхідне значення від оператора з сигналом зворотного зв'язку від термопар. Якщо існує відхилення між бажаним виходом і фактичним виходом, контролер виправляє відхилення, надсилаючи коригувальний сигнал до нагрівальних елементів. Багато екструдерів працюють з температурним контролем, а ступінь непрямого нагрівання або охолодження залежить від того, як експлуатується екструдер. Перепади тиску та сили зсуву впливають на швидкість реакцій і створюють тертя [1, 2, 10, 16]. Нагрів бочки також створює провідникове та конвективне тепло в заповнених та частково заповнених зонах, і частка кожного джерела тепла залежить від фізичних та реологічних властивостей сировини та профілю температури бочки. У цьому випадку джерелом тепла служать електричні нагрівальні елементи. Три пари нагрівальних картриджів закріплені болтами на бочці. Картриджі складаються з чотирьох електричних нагрівальних елементів, які генерують приблизно 3 кВт тепла на кожен картридж. У корпусі бочки у центрі кожного нагрівального картриджа виконані отвори, у яких встановлені термопари для вимірювання температури бочки. Сумарна потужність електричних елементів становить приблизно 18 кВт. Розташування нагрівального елемента та схема контролю температури можна побачити на рисунку 2.4.

Систему нагріву екструдера доцільно розділена на три окремі нагріву, а саме:

- зона нагріву – (ЗН1);
- зона нагріву – (ЗН2);
- зона нагріву – (ЗН3).

Кожна зона нагріву складається з одного набору нагрівальних касет із нагрівальними елементами та двох термопар, розташованих відповідно на верхній і нижній частинах циліндра екструдера. Система контролю температури зони нагріву має працювати незалежно, щоб забезпечити правильну передачу тепла через різні етапи процесу екструзії.

Оператор має можливість встановлювати кожен пару елементів на різну температуру залежно від вимог процесу нагрівання. Наприклад, деяким продуктам потрібно охолонути на кілька градусів перед тим, як вони потраплять у форму. Третій комплект елементів (ЗНЗ) можна тоді встановити на нижчу температуру, ніж перші дві зони нагріву [1]. В інших випадках деяким продуктам також потрібні вищі температури перед введенням у форму, і елементи можна налаштувати відповідно. Нагрівальні елементи мають керований температурний діапазон приблизно від 50°C до 250°C і керуються системою управління ПЛК. Контроль температури екструдера базується на замкненій системі управління з двопозиційним регулюванням, де нагрівальний елемент виступає як кінцевий регулюючий елемент, а термопари – як зворотний зв'язок температури для системи управління ПЛК.

На основі вище зазначеного можна вважати, що застосування сучасних методів контролю до екструзії харчових продуктів є ефективним способом покращення виробництва. Виробництво високоякісних продуктів є необхідним у харчовій промисловості і можливе лише шляхом впровадження доступної системи контролю. Ефективна автоматизація та контроль системи екструзії усувають потенційну можливість людської помилки та можуть покращити оптимізацію процесу. Оптимізація процесу екструзії передбачає постійний зворотний зв'язок параметрів роботи та точне налаштування параметрів для виробництва високоякісної продукції.

Запропоновано автоматизовану систему управління екструдером для забезпечення підтримки параметрів у заданих діапазонах таких як швидкість обертання шнека або налаштування нагріву. Система управління екструдером має такі основні компоненти, керування яким здійснюється за допомогою засобів автоматизації:

1. Система управління екструдером має такі основні компоненти:

1.1. Система подачі. Запропоновано на дні бункера встановити змінний гвинтовий дозатор, щоб забезпечити рівномірну подачу сировини з будь-якою бажаною швидкістю. В середині бункера, безпосередньо над гвинтовим дозатором встановлений повітряний клапан, задля уникнення поганого потоку сипкої сировини, що може призвести до утворення «містка» або «арки». Клапан підключено до компресора, який має подавати стиснене повітря в бункер з проміжною швидкістю, яку контролює система ПЛК, щоб запобігти утворенню тунелів і пустот у сировині. Шнек контролюється за допомогою перемикача на панелі управління, де оператор може вручну вмикати або вимикати шнек коли необхідно подавати сировину в бункер.

1.2. Система екструдера: шнек, нагрівальні елементи, різучі елементи. Шнеки екструдера керуються через операційну систему ПЛК, де оператор вводить заздалегідь визначену задану величину в систему керування задля збільшення або зменшення частоти двигуна. Коли частота двигуна збільшується, сировина подається швидше через екструдер, а при зменшенні частоти на сенсорній панелі відбувається протилежне. Нагрівальні елементи мають керований температурний діапазон приблизно від 50°C до 250°C і управляються системою керування ПЛК. Вважається за доцільне систему

					ННІЕТ КНУ.133.ГМБ-22.2026.ПЗ	Арк.
						36
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

нагріву екструдера розділити на три окремі зони нагріву, а саме: зона нагріву 1, зона нагріву 2, зона нагріву 3. Кожна зона нагріву складається з одного набору нагрівальних касет із нагрівальними елементами та двох термопар, розташованих відповідно на верхній і нижній частинах циліндра екструдера. Система контролю температури зони нагріву спроектована для роботи незалежно, щоб забезпечити правильну передачу тепла через різні етапи процесу екструзії. Контроль температури екструдера базується на замкненій системі управління з двопозиційним регулюванням, де нагрівальний елемент виступає як кінцевий регулюючий елемент, а термопари – як зворотний зв'язок температури для системи управління ПЛК.

1.3. Різучий елемент. Двигун потужністю 0,55 кВт приводить у дію різучий механізм, який розташований на стороні вивантаження продукту з прес-форми екструдера перед формою. Двигун підключено до приводу змінної швидкості та конфігурації ПЛК задля змінної швидкості для збільшення або зменшення частоти двигуна. Коли частота збільшується, швидкість різача зростає і екструдований продукт нарізається на коротші відрізки. Коли частота зменшується, швидкість різача зменшується і різача розрізає екструдований продукт на довші відрізки.

2. Апаратне забезпечення системи керування: датчики та контролери. Системи контролю процесом екструзії відіграє важливу роль, забезпечуючи безпеку продукції та підтримку стандарту якості. Перш за все, датчики є критично важливими елементами систем керування харчовою промисловістю. Вони відповідають за моніторинг різних параметрів, таких як температура, тиск, вологість і швидкість потоку. Завдяки безперервному збору даних у реальному часі з виробничого середовища сенсори дозволяють своєчасно вносити коригування системи, що допомагає забезпечити збереження умов обробки в межах визначених лімітів. Точність і надійність цих датчиків безпосередньо впливають на загальну ефективність системи керування.

Запропоновано, систему екструдера розділити на три окремі зони: зону подачі (ЗП), зону нагріву (ЗН), зону дозування (ЗД). Встановити додаткові температурні датчики в перехідній зоні між зоною нагріву (ЗН) та зоною дозування (ЗД) задля дотримання прямого контакту з екструзією, що забезпечить контроль температури перед виходом сировини з матриці. Встановлення температурних датчиків ближче до сировини, а саме врівень з внутрішньою стінкою барабана уможливить підвищення точності вимірювання температури.

3. Програмне забезпечення системи керування: програма користувача, графічний інтерфейс користувача, режим керування. Інтерфейси людина-машина забезпечують важливий зв'язок між операторами та системою керування. Вони полегшують легкий моніторинг і контроль системи, дозволяючи користувачам візуалізувати дані в реальному часі та ефективно реагувати на системні сповіщення. Взаємодія між датчиками, контролерами, виконавчими механізмами та інтерфейсом людина-машина є необхідним для безперебійної роботи систем керування харчовою промисловістю. Кожен компонент має функціонувати гармонійно для забезпечення безпеки, якості та ефективності у процесах виробництва продуктів харчування.

					ННІЕТ КНУ.133.ГМБ-22.2026.ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		37

РОЗДІЛ 3 АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕНЬ

3.2 Контроль температури під час екструзії

Процес екструзії можна розділити на три етапи, які включають: етап запуску, який передбачає підготовку екструзійного обладнання для процесу екструзії розширених закусочок; етап роботи під час якого кукурудзяні крупи екструдуються і виробляється розширена закусочка та етап зупинки, що включає поетапну зупинку екструзійного обладнання та очищення циліндра. Процес екструзії включає транспортування сировини у бункер. Після того як кукурудзяні крупи потрапляли в екструдер, гвинти з сумісним обертанням просували сировину вперед через екструдер. У систему подавалася вода, а нагрівальні елементи використовувалися для нагрівання сировини перед її пропусканням через отвір матриці діаметром 4 мм. Під час екструдювання розширених закусочок, наприклад сирних завитків, на кінцевий продукт значно впливають наступні критичні параметри [7-8]:

- усередині циліндра екструдера необхідно створити правильний тиск, щоб продукт розширився при виході з екструдера через матрицю;
- відкриття матриці має бути правильного розміру, щоб забезпечити достатнє падіння тиску між внутрішнім циліндровим тиском екструдера та атмосферним тиском;
- необхідна відповідна вологість та тепло для приготування матеріалу;
- швидкість подачі в бункер для зберігання.

Стадія запуску. Панель управління вмикається і всі компоненти екструзії тестуються, щоб переконаватися, що вони працюють належним чином, що робиться з панелі управління. Сировина або кукурудзяна крупа транспортуються в екструдер через шнек. Коли бункер для сировини достатньо заповнений кукурудзяною крупою, шнек зупиняється. Три зони нагрівальних елементів налаштовуються через сенсорну панель для нагрівання циліндра екструдера перед екструзією кукурудзяної крупи. На досягнення циліндром екструдера заданої температури потрібно приблизно 15 хвилин. Запускається дозуючий насос і регулюється швидкість потоку до 50% від номінальної здатності. Тепер сировина змішуватиметься з водою, введеною в бункер екструдера і утворюватиме флюїдизовану композицію кукурудзяної крупи.

Запуск процесу. Фактична швидкість обертання гвинта екструдера – 90 об/хв. Встановлені температури зон спеціальних нагрівальних елементів. Швидкість подачі у приймальному бункері та швидкість обертання гвинта екструдера тепер можна поступово збільшувати на сенсорній панелі. Коли швидкість подачі збільшується занадто швидко, а швидкість обертання гвинта залишається постійною, гвинти можуть не зможуть просувати сировину вперед і

					ННІЕТ КНУ.133.ГМБ-22.2026.ПЗ		
<i>Зм.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>			
<i>Розроб.</i>		<i>Паришков</i>			Удосконалення шнекового екструдера на основі засобів автоматизації	<i>Літ.</i>	<i>Арк.</i>
<i>Перевір.</i>		<i>Цвіркун</i>					
<i>Н. Контр.</i>		<i>Омельченко</i>				38	5
<i>Затверд.</i>		<i>Цвіркун</i>				ННІЕТ КНУ Кафедра ЗІДО	

циліндр може бути переповнений. Швидкість обертання гвинта екструдера та швидкість подачі повинні збільшуватися переривчасто до досягнення бажаного встановленого значення. Тепер можна поступово зменшувати витрату води, закриваючи запірний клапан, поки не буде досягнуто потрібне співвідношення вологості в продукті [1-2]. Температуру зони нагрівального елемента можна збільшити, якщо екструдований продукт не повністю готовий, або зменшити, коли продукт переготовлений. Точку налаштування різального пристрою тепер можна встановити та запустити з сенсорної панелі. Збірка різального пристрою розташована перед отвором матриці та заблокована. Оператор може збільшити швидкість різання, щоб зменшити довжину екструдованого продукту, або зменшити швидкість, щоб отримати довші шматки продукту.

Зони нагрівання в екструдерах відіграють ключову роль у перетворенні харчової сировини. Вони контролюють температуру по всьому циліндру, забезпечуючи рівномірне нагрівання та змішування. Якщо це не вдається, утворюються нерегулярні частинки або перешкоди, які уповільнюють процес. У випадку харчових гранул рівномірне нагрівання забезпечує кращий потік і консистенцію, що підвищує швидкість виробництва. Інакше ефективність швидко падає [7]. Зона нагріву – це секція циліндра екструдера з власними регуляторами температури. Кожна зона нагріває сировину на різних стадіях – від подачі до фінальної екструзії має забезпечувати точний контроль температури запобігає перегріву, що може зіпсувати сировину.

Більша кількість зон дозволяє точніше контролювати процес нагрівання та змішування, що призводить до однорідної сировини, що збільшує пропускну здатність і зменшує відходи. Для підвищення якості рівномірний розподіл тепла запобігає виникненню дефектів, таких як повітряні бульбашки. З іншого боку, менша кількість зон може добре підійти для простих налаштувань, але з складними матеріалами виникають труднощі. Швидкість виробництва зростає, коли зони добре керують коливаннями температури, хоча іноді оператори коригують налаштування під час процесу для вирішення дрібних проблем. Кількість зон безпосередньо впливає на міцність і зручність кінцевого продукту.

У двозонних нагрівальних екструдерах циліндр поділений на секцію подачі та основну зону нагрівання. Перша зона м'яко пом'якшує сировину, а друга поступово підвищує температуру до повного приготування. Контроль температури є базовим, часто з PID-системами, які підтримують постійну температуру без серйозних проблем. Бункер веде до першої зони, а друга зона викидає суміш, що дозволяє здійснювати багато стандартних операцій. Він простий у використанні, з меншою кількістю контролерів для моніторингу. Підходять для малих і середніх виробничих ліній або для матеріалів, які не потребують надточної температури [7]. Однак вони мають обмеження щодо гнучкості для складних рецептів. Якщо сировина має різні температури нагрівання дві зони можуть розподіляти тепло нерівномірно, що призводить до неузгоджень. Оператори іноді виявляють гарячі точки, які знижують якість, що може сприяти більшій кількості відмов і простоїв.

Тризонні нагрівальні екструдери мають циліндр, який поділено на секції

					ННІЕТ КНУ.133.ГМБ-22.2026.ПЗ	Арк.
						39
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

подачі, стиснення та дозування. Першу зону повільно попередньо нагрівають, щоб уникнути раптових змін температури матеріалу. Проміжна зона створює тиск і повністю змішується. Остання зона забезпечує точне коригування для рівномірної екструзії. Керування використовує просунуту логіку, наприклад, зоновані термопари, які регулюються в реальному часі. Конфігурація дозволяє поступово підвищувати температуру, що є критично важливим для харчової промисловості. Рівномірний розподіл температури – велика перевага, оскільки зменшує дефекти в кінцевому готового продукту, що дозволяє краще працювати зі складними матеріалами, наприклад, з добавками, що потребують специфічних етапів нагрівання. Така конфігурація покращує якість нагріву і підтримує стабільність виробництва навіть під час тривалих змін.

Контроль температури екструзії включає секцію подачі, секцію нагрівання та дозувальну секцію. Тепло від підвищення температури має два джерела: зовнішнє – нагрівання, друге – механічне тертя та зсув. Секція подачі та вимірювання є ключовими та складними для регулювання температури протягом усього процесу екструзії. Слід пам'ятати, що тіло контролю температури – це температура сировини, а не температура гвинта та форми.

Секція подачі сировини. Температура ствола в секції подачі повинна регулюватися на рівні 100~140°C загалом. Якщо температура подачі занадто низька, площа транспортування твердих речовин буде подовжена, а довжина зони пластифікації та зони нагрівання зменшується, що призводить до поганої пластифікації та впливає на якість продукції [8]. На практиці також рекомендується встановлювати температуру секції подачі на рівні 185-195°C, оскільки температура секції подачі передається гвинту електричним нагрівачем, і відображається температура гвинтового ствола, а не температура матеріалу. Температура сировини зазвичай значно нижча за показану температуру, фактична температура матеріалу становить лише 100~130°C.

Вважається за доцільне секцію нагріву екструдера розділити на три окремі зони нагріву, а саме: зона нагріву 1, зона нагріву 2, зона нагріву 3. Здійснено моделювання контролю температури під час екструзії в секції нагріву.

1. Початковий встановлений параметр для зони нагріву 1 був встановлений на 120°C, щоб прискорити процес нагрівання циліндра і був зменшений до 100°C через 5 хвилин. На рисунку 3.1 видно, що фактична температура циліндра, виміряна в цій зоні після скидання встановленого параметра до 100°C на 9-й хвилині нижча за встановлений параметр на 8°C, а на 14-й хвилині перевищує встановлений параметр на 16°C. Можливе пояснення цього полягає в тому, що швидкість теплопередачі шляхом теплопровідності між нагрівальним елементом і циліндром більша за швидкість теплопередачі шляхом конвекції між циліндром і матеріалом у циліндрі [1-2]. Друге пояснення цього також може полягати в тому, що коефіцієнт теплопередачі для матеріалу циліндра набагато вищий, ніж для матеріалу в барабані. Це свідчить про те, що в барабані відбуватиметься кращий теплообмін. Також слід зазначити, що перша зона нагріву у порівнянні з іншими двома зонами нагріву працює довші інтервали, оскільки початкові

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

температури на вході для двох вхідних потоків значно нижчі, ніж температура потоку на вході до зони нагріву 2 та зони нагріву 3 у барабані.

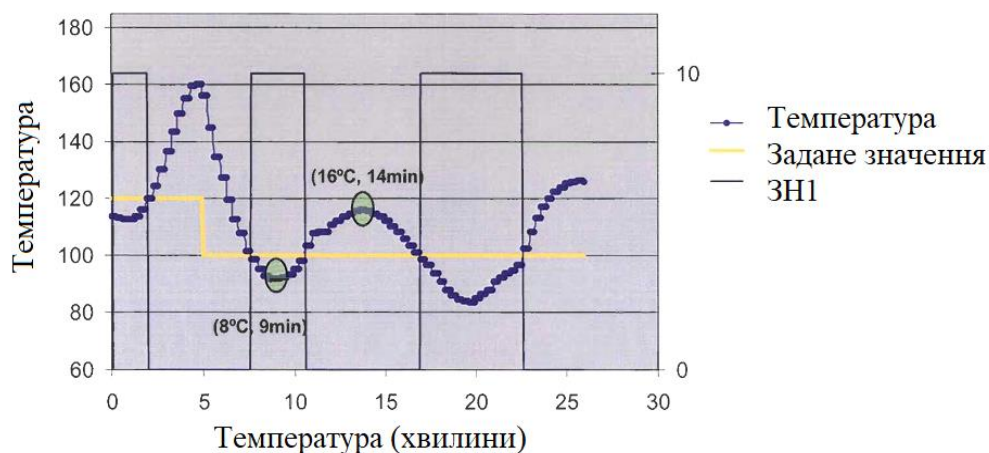


Рисунок 3.1 – Температура в зоні нагріву 1

Температура зони пластифікації матеріалу контролюється при рівні 170~190°C. Контроль вакуумного ступеня в цій ділянці є важливим індексом процесу, якщо він низький, це впливає на вплив витоку, що призведе до утворення бульбашок та суттєвого зниження механічних властивостей сировини [1-2, 8]. Початкова встановлена точка для зони нагрівання 2 була встановлена на 150°C для прискорення процесу нагрівання ствола і знижена до 120°C через 11 хвилин (рис. 3.2). Фактична температура ствола, виміряна в цій зоні після повернення встановленої температури на 120°C на 17 хвилині не досягає встановленого значення на 12°C, а на 23 хвилині перевищує його на 23°C.

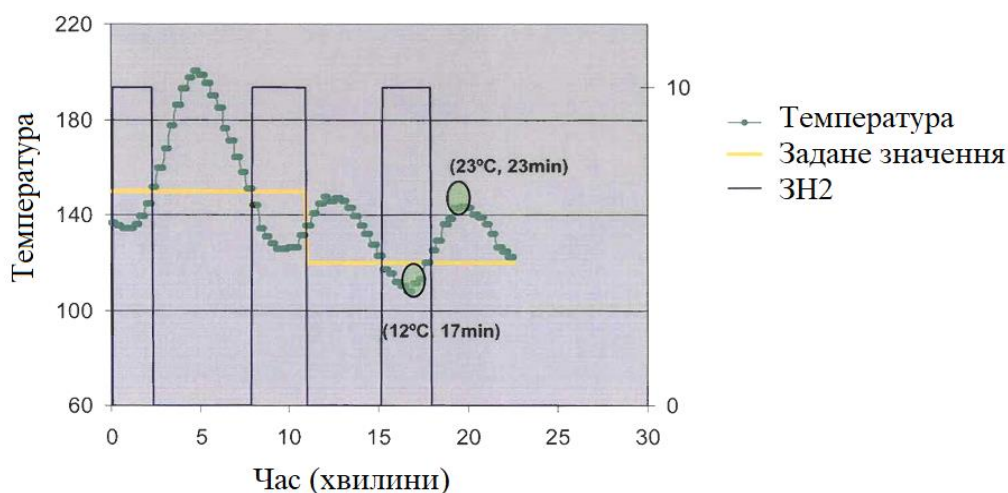


Рисунок 3.2 – Температура в зоні нагрівання 2

Зона нагрівання розташована посередині ствола між зоною нагрівання 1 та зоною нагрівання 2. Тепло, що генерується в зоні нагрівання 1 та в зоні нагрівання 2 також допомагає зоні нагрівання 2 відновлювати тепло, передане сировині у стволі. Зона нагріву 2 у порівнянні з першою та другою зонами нагрівання працює однаково довго, але коротшими періодами. Вимірювання температури та контроль температури барабана для зони нагріву 2.

Температура вимірювальної зони нагрівання 3 має бути трохи нижчою, зазвичай 160~180°C, що головним чином базується на зсувній ефективності та екструзійній здатності екструдера, щоб переконатися, що відображена температура становить 185°C (рис. 3.3). Головка є важливою частиною екструзійного формування, що передбачає створення вищого тиску плавлення та формування розплаву у бажану форму. Занадто висока температура нагрівання прискорює процес приготування продукту, зміни кольору, піну тощо, що відзначиться на якості продукції. Тому, за потреби, необхідно регулювати температуру гвинта та швидкість подачі [1-2, 8]. Початкову задану температуру для зони нагрівання 3 встановили на рівні 180°C, щоб прискорити процес нагрівання ствола, а через 7 хвилин її знизили до 160°C. Фактична температура ствола, виміряна в цій зоні після встановлення заданої температури на 160°C на 11-й хвилині не досягає заданої температури на 28°C, а на 15-й хвилині перевищує її на 25°C. Зона була встановлена на вищу задану температуру через специфіку процесу екструзії. Підвищена температура збільшує тиск за матрицею та допомагає процесу екструзії, забезпечуючи більший перепад тиску через матрицю для виробництва харчової сировини.

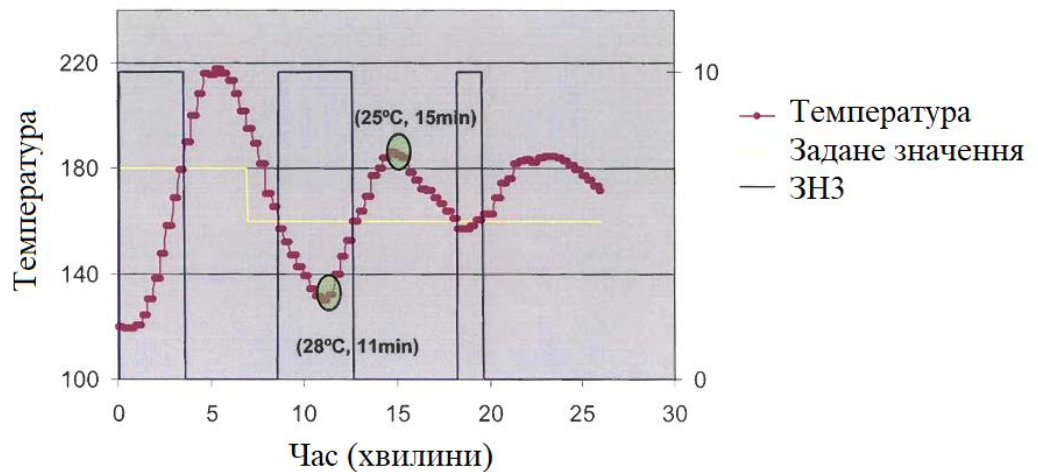


Рисунок 3.3 – Температура в зоні нагрівання 3

На основі вище зазначеного можна вважати, що контроль температури в екструдері є критично важливим аспектом виробничого процесу, оскільки безпосередньо впливає на якість, продуктивність і ефективність виготовлених сировини. Здійснено моделювання контролю температури під час екструзії в секції нагрівання. Система нагріву екструдера розділена на три окремі зони нагріву, а саме: зона нагріву 1, зона нагріву 2, зона нагріву 3. Результати свідчать, що перша зона нагріву у порівнянні з іншими двома зонами нагріву працює довші інтервали, оскільки початкові температури на вході значно нижчі, ніж температура потоку на вході до зони нагріву 2 та зони нагріву 3 у барабані. Зона нагріву 2 у порівнянні з першою та другою зонами нагрівання працює однаково довго, але коротшими періодами. Температура зони нагрівання 3 є трохи нижчою, що головним чином базується на зсувній ефективності та екструзійній здатності екструдера.

ВИСНОВКИ

Бакалаврська робота присвячена удосконаленню шнекового екструдера на основі засобів автоматизації. У роботі зазначено, що застосування сучасних методів контролю до екструзії харчових продуктів є ефективним способом покращення виробництва. Виробництво високоякісних продуктів є необхідним у харчовій промисловості і можливе лише шляхом впровадження доступної системи контролю. Ефективна автоматизація та контроль системи екструзії усувають потенційну можливість людської помилки та можуть покращити оптимізацію процесу.

У першому розділі здійснено аналіз обладнання для процесу екструзії. Вважається, що екструзія харчових продуктів – це процес у якому харчовий матеріал змушується та тече через форму за однієї або кількох умов. Тому технологія поєднує кілька одиничних операцій, включаючи змішування, нагрівання, різання, стискання та формування. Екструдер для сировини – це пристрій, який прискорює процес формування та перетворення харчових інгредієнтів. Екструдери можна використовувати для приготування, формування, змішування, надання текстури та формування харчових продуктів за умов, що сприяють збереженню якості, високій продуктивності та низькій вартості.

Аналіз наукових джерел дав змогу здійснити класифікацію екструдерів. Шнекові екструдери зазвичай класифікують відповідно до кількості механічної енергії, яку вони можуть генерувати. Екструдер низького зсуву призначений для мінімізації механічної енергії, щоб уникнути варіння тіста, наприклад для екструзії пасти. Екструдер високого зсуву розроблений для генерації високого рівня механічної енергії, яка перетворюється на тепло для приготування тіста. Екструдери можна розрізняти за способом їх роботи: безперервні або переривчасті. Безперервні екструдери обладнані обертовими частинами, тоді як переривчасті екструдери видавлюють сировину у повторюваному режимі. Принцип роботи цієї машини дуже простий: матеріал потрапляє в бункер екструдера зазвичай під дією сили тяжіння і проштовхується вниз уздовж ствола обертанням гвинта. Проштовхування створює тертя між стінками ствола і гвинтом, тим самим генеруючи теплову енергію, необхідну для стиснення матеріалу.

Вважається, що одношнекові екструдери є найпоширенішим типом екструдерів, що використовуються в харчовій промисловості, через їх просту конструкцію, відносно низьку вартість та надійність. Їхній гвинт має лише одну зону стиснення, хоча гвинт має три чітко виражені геометричні секції: перша секція зазвичай має глибокі канавки. Одношнековий екструдер зазвичай використовують для простих типів сировини, закусок та сніданкових пластівців. Швидкість виробництва та якість продукту значно змінюються під

					ННІЕТ КНУ.133.ГМБ-22.2026.ПЗ									
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата										
Розроб.		Паршуков			Удосконалення шнекового екструдера на основі засобів автоматизації				Літ.		Арк.		Аркушів	
Перевір.		Цвіркун									43		3	
									ННІЕТ КНУ Кафедра ЗІДО					
Н. Контр.		Омельченко												
Затверд.		Цвіркун												

час процесу екструдювання через нерівномірний розподіл тиску вздовж циліндра. Двошнекові екструдери можна експлуатувати на вищих швидкостях шнеків, ніж протилежно-обертові, оскільки радіальні сили розподіляються більш рівномірно. В цілому, двошнекові екструдери пропонують найбільшу гнучкість у виробництві широкого спектра харчових продуктів.

Другий розділ присвячено автоматизації та контролю системи екструзії. Зазначено, що контроль змінних процесу екструзії є важливим для забезпечення виготовлення успішного продукту. Важливо розуміти, які змінні процесу можна контролювати безпосередньо, а які змінні є результатом того, що контролюється в системі. Змінні процесу екструзії можна поділити на дві категорії: незалежні змінні та залежні змінні. Взаємодія змінних процесу екструзії має велике значення для оператора екструдера. Зміна незалежних змінних може призвести до зміни характеристик кінцевого продукту.

Запропоновано автоматизовану систему управління екструдером для забезпечення підтримки параметрів у заданих діапазонах таких як швидкість обертання шнека або налаштування нагріву. Система управління екструдером має такі основні компоненти, керування яким здійснюється за допомогою засобів автоматизації:

1. Система управління екструдером має такі основні компоненти:

1.1. Система подачі. Запропоновано на дні бункера встановити змінний гвинтовий дозатор, щоб забезпечити рівномірну подачу сировини з будь-якою бажаною швидкістю. В середині бункера, безпосередньо над гвинтовим дозатором встановлений повітряний клапан, задля уникнення поганого потоку сипкої сировини, що може призвести до утворення «містка» або «арки». Клапан підключено до компресора, який має подавати стиснене повітря в бункер з проміжною швидкістю, яку контролює система ПЛК, щоб запобігти утворенню тунелів і пустот у сировині. Шнек контролюється за допомогою перемикача на панелі управління, де оператор може вручну вмикати або вимикати шнек коли необхідно подавати сировину в бункер.

1.2. Система екструдера: шнек, нагрівальні елементи, різучі елементи. Шнеки екструдера керуються через операційну систему ПЛК, де оператор вводить заздалегідь визначену задану величину в систему керування задля збільшення або зменшення частоти двигуна. Коли частота двигуна збільшується, сировина подається швидше через екструдер, а при зменшенні частоти на сенсорній панелі відбувається протилежне. Нагрівальні елементи мають керований температурний діапазон приблизно від 50°C до 250°C і управляються системою керування ПЛК. Вважається за доцільне систему нагріву екструдера розділити на три окремі зони нагріву, а саме: зона нагріву 1, зона нагріву 2, зона нагріву 3. Кожна зона нагріву складається з одного набору нагрівальних касет із нагрівальними елементами та двох термопар, розташованих відповідно на верхній і нижній частинах циліндра екструдера. Система контролю температури зони нагріву спроектована для роботи незалежно, щоб забезпечити правильну передачу тепла через різні етапи процесу екструзії. Контроль температури екструдера базується на замкненій системі управління з двопозиційним регулюванням, де нагрівальний елемент

					ННІЕТ КНУ.133.ГМБ-22.2026.ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		44

виступає як кінцевий регулюючий елемент, а термопари – як зворотний зв'язок температури для системи управління ПЛК.

1.3. Різучий елемент. Двигун потужністю 0,55 кВт приводить у дію різучий механізм, який розташований на стороні вивантаження продукту з прес-форми екструдера перед формою. Двигун підключено до приводу змінної швидкості та конфігурації ПЛК задля змінної швидкості для збільшення або зменшення частоти двигуна. Коли частота збільшується, швидкість різача зростає і екструдований продукт нарізається на коротші відрізки. Коли частота зменшується, швидкість різача зменшується і різача розрізає екструдований продукт на довші відрізки.

2. Апаратне забезпечення системи керування: датчики та контролери. Перш за все, датчики є критично важливими елементами систем керування харчовою промисловістю. Вони відповідають за моніторинг різних параметрів, таких як температура, тиск, вологість і швидкість потоку. Запропоновано, систему екструдера розділити на три окремі зони: зону подачі (ЗП), зону нагріву (ЗН), зону дозування (ЗД). Встановити додаткові температурні датчики в перехідній зоні між зоною нагріву (ЗН) та зоною дозування (ЗД) задля дотримання прямого контакту з екструзією, що забезпечить контроль температури перед виходом сировини з матриці. Встановлення температурних датчиків ближче до сировини, а саме врівень з внутрішньою стінкою барабана уможливить підвищення точності вимірювання температури. Здійснено моделювання контролю температури під час екструзії в секції подачі, нагрівання та дозування.

3. Програмне забезпечення системи керування: програма користувача, графічний інтерфейс користувача, режим керування. Взаємодія між датчиками, контролерами, виконавчими механізмами та інтерфейсом людина-машина є необхідним для безперебійної роботи систем керування харчовою промисловістю. Кожен компонент має функціонувати гармонійно для забезпечення безпеки, якості та ефективності у процесах виробництва продуктів харчування.

Третій розділ присвячено контролю температури в екструдері, що є критично важливим аспектом виробничого процесу, оскільки безпосередньо впливає на якість, продуктивність і ефективність виготовлених сировини. контроль температури в екструдері є критично важливим аспектом виробничого процесу, оскільки безпосередньо впливає на якість, продуктивність і ефективність виготовлених сировини. Здійснено моделювання контролю температури під час екструзії в секції нагрівання. Система нагріву екструдера розділена на три окремі зони нагріву, а саме: зона нагріву 1, зона нагріву 2, зона нагріву 3. Результати свідчать, що перша зона нагріву у порівнянні з іншими двома зонами нагріву працює довші інтервали, оскільки початкові температури на вході значно нижчі, ніж температура потоку на вході до зони нагріву 2 та зони нагріву 3 у барабані. Зона нагріву 2 у порівнянні з першою та другою зонами нагрівання працює однаково довго, але коротшими періодами. Температура зони нагрівання 3 є трохи нижчою, що головним чином базується на зсувній ефективності та екструзійній здатності екструдера.

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

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Effective control of a low-cost twin-screw food extruder. URL: <https://repository.nwu.ac.za/items/ecb4ce03-141e-453a-8baf-1dbab0149076>.
2. The development of a control system for gravimetric feeding of a twin screw extruder. URL: <https://repository.nwu.ac.za/items/aabd35b5-4f2b-465d-b14e-f6e5a40367e1>.
3. Екструзія і екструдери. Режим доступу: <https://intmax.com.ua/zastosuvannya/extruders-1.html>.
4. Екструдер: поняття, сфери застосування, класифікація та принцип дії. Режим доступу: <https://techtronic.com.ua/ekstruder-shho-ce-take-navishho-vin-priznachenij>.
5. Типи екструдерів за кількістю та типом шнеків. Режим доступу: <https://ten24.com.ua/ua/blog/tipy-ekstrudero-v-po-kolichestvu-i-tipu-shnekov/>.
6. Cómo controlar la temperatura en una máquina de extrusión. URL: <https://www.generatemachinery.com/blog/how-to-control-the-temperature-in-an-extrusion-machine-432138.html>.
7. Cómo seleccionar su extrusor: dos zonas de calentamiento frente a tres zonas de calentamiento. URL: <https://es.powdermachines.com/how-to-select-your-extruder-two-heating-zone-vs-three-heating-zone>.
8. Cómo controlar la temperatura de ajuste del proceso de moldeo por extrusora. URL: <https://es.songhu3dprint.com/article/how-to-control-the-setting-temperature-of-extruder-molding-process.html>.
9. Що таке автоматична екструзія і як вона працює? Режим доступу: <https://www.yjing-extrusion.com/uk/what-is-automatic-extrusion-and-how-does-it-work.html>.
10. Півоваров О.А. Інноваційний інжиніринг в окремих галузях харчового виробництва / О.А. Півоваров, О.С. Ковальова, В.С. Кошулько. Дніпро: ФОП Обдимко О.С., 2022. 407 с.
11. Основи проектування однокерв'ячних екструдерів / І.О. Мікульонок, О.Л. Сокольський, В.І. Сівецький, Л.Б. Радченко. К.: НТУУ «КПІ», 2015. 200 с.
12. Energy analysis in the extrusion of plastics. URL: https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/53774/NANA_LEVI.pdf?sequence.
13. Extrusión. URL: <https://rua.ua.es/server/api/core/bitstreams/5209800b-3ed8-4544-a42a-656864f56c50/content>.
14. Understanding Food Processing Control Systems: Ensuring Safety, Quality, and Efficiency. URL: <https://diversedaily.com/understanding-food-processing-control-systems-ensuring-safety-quality-and-efficiency/>.
15. Автоматизація технологічних процесів і системи автоматичного керування / О.В. Барало, П.Г. Самойленко, С.Є. Гранат, В.О. Ковальов. К.: Аграрна освіта, 2010. 557 с.
16. Автоматизація технологічних процесів і виробництв харчової промисловості / А.П. Ладанюк, В.Г. Трегуб, І.В. Ельперін. К.: Аграрна освіта, 2001. 224 с.
17. Ладанюк А.П. Методи сучасної теорії управління / А.П. Ладанюк, В.Д. Кишенько, Н.М. Луцька, В.В. Іващук. К.: НУХТ, 2010. 195 с.

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