

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 З
ІНТЕГРОВАНОЮ СИСТЕМОЮ ОХОЛОДЖУВАЛЬНИХ РОЛИКІВ»**

Виконав:

здобувач вищої освіти _____ Єрмілко Олександр Іванович _____
(прізвище, ім'я, по-батькові) (підпис)

Керівник:

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

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

Здобувач вищої освіти _____
(підпис)

Кривий Ріг
2026

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

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

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Гарант освітньої програми «Обладнання
переробних і харчових виробництв»

Цвіркун Л.О.
« » 2026 року

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

Єрмілко Олександр Івановичу
(прізвище, ім'я, по-батькові)

1. Тема кваліфікаційної роботи: «Удосконалення шнекового екструдера з інтегрованою системою охолоджувальних роликів»

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

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

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

3. Вихідні дані до роботи:

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

4. Зміст пояснювальної записки:

1. Вступ.
2. Аналіз обладнання для екструзії продуктів харчування.
3. Удосконалення шнекового екструдера з інтегрованою системою охолоджувальних роликів.
4. Аналіз результатів досліджень.

5. Висновки.
6. Список використаних джерел.

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

Узагальнення основних параметрів роботи екструдера.

Удосконалення конструкції блоку охолодження.

Моделювання контролю температури в екструдері.

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 екструзії продуктів харчування	16.02.2026-10.03.2026
3	Удосконалення шнекового екструдера з інтегрованою системою охолоджувальних роликів	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)

Єрмілко О.І.

(прізвище та ініціали)

Керівник роботи

(підпис)

Омельченко О.В.

(прізвище та ініціали)

РЕФЕРАТ

Обсяг і структура бакалаврської роботи. Повний обсяг бакалаврської роботи – 50 сторінок, в тому числі основного тексту – 47 сторінки. Робота містить 12 рисунків, 5 таблиць. Список використаних джерел складається з 26 найменувань.

Об'єкт роботи – шнековий екструдер.

Предмет роботи – процес охолодження екструзійної сировини.

Мета роботи – удосконалення шнекового екструдера з інтегрованою системою охолоджувальних роликів.

У роботі зазначено, що глобальний попит на доступні та збалансовані продукти продовжує зростати, що призводить до стрімких інновацій у технологіях переробки харчових продуктів. Серед них приготування методом екструзії стало одним із найбільш трансформаційних способів виробництва готових до вживання продуктів, таких як закуски, сніданкові каші, білкові добавки та дитяче харчування.

На основі аналізу, було зазначено, що контроль основних параметрів процесу екструзії є одним з чільних місць. Узагальнено вхідні, вихідні та системні змінні, пов'язані з процесом екструзії, а саме системні змінні: температурний профіль, тиск на матриці, крутний момент, ступінь заповнення; змінні процесу: температура, швидкість подачі, швидкість шнека, додавання води/пари, швидкість різача; змінні конструкції екструдера: конфігурація шнека, розмір/ форма матриці, довжина циліндра; продуктивність екструдера: пропускна здатність, споживана енергія; цільові змінні: текстура, колір, смак, харчова цінність.

Запропоновано удосконалену конструкцію блоку охолодження, що забезпечує відведення тепла від продукту через поверхню ролика за допомогою охолодженої води, яка циркулює через охолоджуючий ролик. Обмін води здійснюється з використанням роторного з'єднувача, а основний охолоджуючий ролик є єдиним роликом, який контактує з продуктом. Конструкція блоку охолодження роликів була вдосконалена, внаслідок чого забезпечує ефективне відведення тепла від продукту завдяки тривалому контакту сировини з охолодженим роликом, завдяки концепції обгорткового ремня. Конструкція є доцільною для таких продуктів, наприклад, як екструдовані жувальні гумки, лакриця, ірис та деякі види м'яких цукерок. Швидке охолодження на роликах запобігатиме прилипанню та дозволить сформувати виріб.

Оптимізовано модульний шнек, який складається з набору елементів, що включають: шнеки подачі, змішувальні елементи та елементи стиснення. Здійснено моделювання розподілу температури та швидкості вздовж гвинта. В процесі моделювання виявлено, що лінії потоку мають змінний профіль швидкості через геометрію гвинтів. Чим більша відстань між осьовими краями секції гвинта, тим довше сировина переходить до наступної секції і тим менша її швидкість. У секціях гвинта з кутами, які мають кут близький до 90°, сировина рухається повільніше, бо там відбувається краще змішування.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: екструзія, шнековий екструдер, система охолодження, модульний шнек, моделювання.

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

ЗМІСТ

ВСТУП	6
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ ЕКСТРУЗІЇ ПРОДУКТІВ ХАРЧУВАННЯ	7
1.1 Процес екструзії в харчовій промисловості	7
1.2 Типи екструдерів та їхні експлуатаційні характеристики	9
1.3 Компоненти екструдеру	13
1.4 Змінні процесу та контроль процесу екструзії	20
РОЗДІЛ 2. УДОСКОНАЛЕННЯ ШНЕКОВОГО ЕКСТРУДЕРА З ІНТЕГРОВАНОЮ СИСТЕМОЮ ОХОЛОДЖУВАЛЬНИХ РОЛИКІВ	22
2.1 Теплові та механічні властивості екструдерів	22
2.2 Проектування основних компонентів екструдера	27
2.3 Системи нагрівання та охолодження в екструдері	31
2.3 Удосконалення конструкції блоку охолодження	35
РОДІЛ 3. АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕНЬ	40
3.1 Контроль температури в екструдері	40
ВИСНОВКИ	44
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	46
ДОДАТКИ	48

					ННІЕТ КНУ.133.ГМБ-22.2026.ПЗ								
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата									
Розроб.		Єрмілко			Удосконалення шнекового екструдера з інтегрованою системою охолоджувальних роликів				Лім.	Арк.	Аркушів		
Перевір.		Омельченко									5	1	
									ННІЕТ КНУ Кафедра ЗІДО				
Н. Контр.		Омельченко											
Затверд.		Цвіркун											

ВСТУП

Актуальність роботи. У роботі зазначено, що глобальний попит на доступні та збалансовані продукти продовжує зростати, що призводить до стрімких інновацій у технологіях переробки харчових продуктів. Серед них приготування методом екструзії стало одним із найбільш трансформаційних способів виробництва готових до вживання продуктів, таких як закуски, сніданкові каші, білкові добавки та дитяче харчування.

Мета та задачі дослідження. Удосконалення шнекового екструдера з інтегрованою системою охолоджувальних роликів.

Практична та наукова новизна. На основі аналізу, було зазначено, що контроль основних параметрів процесу екструзії посідає одне з чільних місць. Узагальнено вхідні, вихідні та системні змінні, пов'язані з процесом екструзії, а саме системні змінні: температурний профіль, тиск на матриці, крутний момент, ступінь заповнення; змінні процесу: температура, швидкість подачі, швидкість шнека, додавання води/пари, швидкість різака; змінні конструкції екструдера: конфігурація шнека, розмір/ форма матриці, довжина циліндра; продуктивність екструдера: пропускна здатність, споживана енергія; цільові змінні: текстура, колір, смак, харчова цінність.

Запропоновано удосконалити конструкцію блоку охолодження, що забезпечує відведення тепла від продукту через поверхню ролика за допомогою охолодженої води, яка циркулює через охолоджуючий ролик. Обмін води здійснюється з використанням роторного з'єднувача, а основний охолоджуючий ролик є єдиним роликом, який контактує з продуктом. Конструкція блоку охолодження роликів була вдосконалена, внаслідок чого забезпечує ефективне відведення тепла від продукту завдяки тривалому контакту сировини з охолодженим роликом, завдяки концепції обгорткового ремня. Конструкція є доцільною для таких продуктів, наприклад, як екструдовані жувальні гумки, лакриця, ірис та деякі види м'яких цукерок. Швидке охолодження на роликах запобігатиме прилипанню та дозволить сформувати виріб.

Оптимізовано модульний шнек, який складається з набору елементів, що включають: шнеки подачі, змішувальні елементи та елементи стиснення. Кожен елемент має свою функцію і в різних комбінаціях та послідовностях він дозволяє всьому гвинту виконувати своє обробне завдання. Здійснено моделювання розподілу температури та швидкості вздовж гвинта. В процесі моделювання виявлено, що лінії потоку мають змінний профіль швидкості через геометрію гвинтів. Чим більша відстань між осьовими кінцями секції гвинта, тим довше сировина переходить до наступної секції і тим менша її швидкість. У секціях гвинта з кутами, які мають кут близький до 90°, сировина рухається повільніше, бо там відбувається краще змішування.

					ННІЕТ КНУ.133.ГМБ-22.2026.ПЗ		
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			
Розроб.	Єрмілко				Удосконалення шнекового екструдера з інтегрованою системою охолоджувальних роликів	Літ.	Арк.
Перевір.	Омельченко						
Н. Контр.	Омельченко					6	1
Затверд.	Цвіркун					ННІЕТ КНУ Кафедра ЗІДО	

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ ЕКСТРУЗІЇ ПРОДУКТІВ ХАРЧУВАННЯ

1.1 Процес екструзії в харчовій промисловості

Екструзія – це безперервний або напівбезперервний процес формування сировини у однорідну форму шляхом витискання через форму під контрольованими умовами. Така форма або продукт постачається з високою продуктивністю. У процесі екструзії сировина може мати різні форми, розміри та типи залежно від призначення готового виробу. Екструзію також можна визначити як формування матеріалу силою через спеціально розроблений отвір, найчастіше після попереднього нагрівання сировини [6, 7]. Основна перевага цього процесу порівняно з іншими виробничими процесами полягає у здатності створювати складні поперечні перетини та обробляти крихкі матеріали. Екструзійний процес – це термічний метод обробки, що застосовує високу температуру, тиск і зсувну силу на сирі маси, отримуючи широкий спектр харчових продуктів, таких як закуски, готові до вживання пластівці, кондитерські вироби, продукти для відлучення, хрусткий хліб, молочні продукти, паста, м'ясні аналоги та подовжувачі.

Екструзія особливо застосовна в переробці харчових продуктів. Екструзійне приготування дозволяє отримувати широкий спектр готових продуктів з недорогих сировинних матеріалів з мінімальним часом обробки. Більшість зернових можна екструдувати, і продукти на основі зернових, такі як хліб, тістечка, печиво, крекери та сніданкові каші, можуть бути оброблені методом екструзії. Процес екструзії харчових продуктів передбачає проштовхування матеріалу через отвір потрібного розміру за допомогою гвинтового екструдера [6, 7]. Екструзія харчових продуктів в першу чергу використовується для продуктів із зернових і круп, таких як паста, сніданкові пластівці, готове тісто та готові до споживання закуски. Закуски, виготовлені за новими контрольованими процесами екструзії, тепер можуть мати хрустку зовнішню оболонку та м'яку внутрішню частину. Інші продукти, такі як певні види м'яса та пюре, також піддавалися екструзії. Екструзія використовується також із зерновими, такими як пшениця, кукурудза та рис. Процес екструзії може проводитися гарячим та холодним способом.

Гаряча екструзія передбачає нагрівання сировини вище 100⁰С, використовуючи фрикційне нагрівання для швидкого підвищення температури. Нагріта сировина проходить через секції бочки з невеликими прольотами для посилення зсуву та тиску. Після формування швидке охолодження видаляє вологу у вигляді пари. У процесі екструзії створюються нові продукти, такі як

					ННІЕТ КНУ.133.ГМБ-22.2026.ПЗ								
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата									
Розроб.		Єрмілко			Удосконалення шнекового екструдера з інтегрованою системою охолоджувальних роликів				Лім.	Арк.	Аркушів		
Перевір.		Омельченко									7	15	
Н. Контр.		Омельченко							ННІЕТ КНУ Кафедра ЗІДО				
Затверд.		Цвіркун											

пухкі пластівці та розширені закуски. Гаряче екструдювання проводиться при підвищеній температурі, щоб уникнути налипання сировини та полегшити його проштовхування через матрицю. Недоліком цього процесу є висока вартість обладнання та його обслуговування, хоча витрати на інструменти залишаються низькими, оскільки ті ж матриці можна використовувати повторно. Гаряче екструдювання найкраще підходить, коли матеріал повинен залишатися м'яким, щоб пройти через матрицю без руйнування, наприклад, цукерки [6, 7]. Щоб запобігти окисленню та поглинанню вологи під час зберігання, упаковка відіграє важливу роль у збереженні якості як холодних так і гарячих екструдюваних продуктів. Оскільки екструзія передбачає поєднання теплопередачі, масообміну, змін тиску та зсуву, вона спричиняє велику кількість складних змін у продуктах, включно з гідратацією крохмалю та білків, гомогенізацією, зсувом, плавленням жирів, денатурацією або переорієнтацією білків, пластифікацією та розширенням харчової структури.

При холодній екструзії харчові матеріали нагріваються нижче 100⁰С, задля підтримки температури для формування та змішування різних продуктів, таких як тісто, м'ясо та паста. Низька температура та відповідна екструзія під низьким тиском зменшують проблеми, пов'язані з високими температурами приготування [3-7]. Збереження холодних екструдюваних продуктів передбачає охолодження, випікання або сушіння. Переваги цього методу над гарячим екструдюванням полягають у відсутності окислення, більшій міцності завдяки холодному обробленню, швидкому процесу екструзії, якщо матеріал схильний до гарячої крихкості. Екструдювані продукти охоплюють різноманітний асортимент: від безпосередньо розширених перекусів і сніданкових пластівців до текстурованих білків, кондитерських виробів, замінників м'яса, готової пасти та функціональних продуктів. Порівняння холодної та гарячої екструзії наведено в таблиці 1.1

Таблиця 1.1 – Порівняння холодної та гарячої екструзії [7]

Характеристика	Холодна екструзія	Гаряча екструзія
Температура	Процес виконується при кімнатній температурі або близькій до неї.	Включає нагрівання харчових матеріалів до вищих температур, зазвичай понад 100 ⁰ С.
Властивості матеріалу	Підходить для стабільних твердих або напівтвердих продуктів, які можуть зберігати свою структуру без значного нагрівання.	Використовується для матеріалів, які потребують термічних змін для досягнення бажаної текстури чи консистенції.
Різноманіття продукції	Добре підходить для виробництва таких продуктів, як паста, локшина, певні закуски, вироби на основі тіста та деякі кондитерські вироби.	Дозволяє використовувати різноманітні продукти, такі як перекуси, сніданкові пластівці, м'ясні аналоги, текстуровані рослинні білки та інші термічно оброблені харчові продукти.

Характеристики продукції	продукти з щільнішою та жорсткішою текстурою.	Дозволяє створювати розширені та пористі продукти.
Обладнання	Машина для пасти, екструдери для тіста та спеціалізовані форми або штампи для формування різних продуктів харчування.	Екструдери, які нагрівають і готують їжу в контрольованих умовах. Для формування екструдованого продукту також можуть використовуватися штампи та форми.
Енергоспоживання	Зазвичай споживає менше енергії, оскільки не вимагає значних процесів нагрівання.	Потрібна енергія для нагрівання харчової речовини. Енергія може відрізнятися залежно від продукту та потреб у обробці.

Концепція, що лежить в основі надкритичної рідинно-допоміжної екструзії, полягає у використанні надкритичної рідини, зазвичай CO_2 , вводиться як видувний агент у сировину, що містить леткі мікроелементи, ароматизатори та барвники. Вода додається до інгредієнтів для використання пластифікатора, а пара допомагає нагрівати інгредієнти для приготування сировини. Після приготування пара допомагає запобігти розпушенню продукту та знижує температуру продукту через спалах води в зоні охолодження. Зона охолодження знижує температуру нижче 100°C , поступово підвищуючи тиск до надкритичних рівнів. Потім надкритичний вуглекислий газ вводиться у відповідну зону [3-7]. Зсувні сили, створені змішувальним гвинтом, розщеплюють надкритичний вуглекислий газ на дрібні бульбашки, що призводить до розширення екструдатів при виході з кристала. Надкритичний вуглекислий газ покращує однородність кінцевого продукту за допомогою більш гладких поверхонь. Він перевершує пару за розширенням, служачи як розпушувач і скорочуючи час обробки для заквашеного тіста. Надкритична рідинно-допоміжна екструзія використовує CO_2 як видувний агент, покращуючи фізико-хімічні властивості, зовнішній вигляд, розширення та антиоксидантні властивості.

1.2 Типи екструдерів та їхні експлуатаційні характеристики

Екструдер безсумнівно є найважливішим обладнанням у харчовій промисловості, що робить його одним із головних процесів останніх десятиліть. Екструдери використовуються для змішування, гомогенізації, зволоження, зневоднення, плавлення, приготування, різання, розширення та текстурування різних продуктів. Машина гвинтової екструзії часто містить декілька (зазвичай

два) гвинти замість одного, які можуть обертатися в одному чи протилежних напрямках. Тісно зачіплювані двогвинтові екструдери займають провідне місце серед екструдерів і використовуються в найрізноманітніших застосуваннях. Продукти харчової екструзії включають макаронні вироби, ковбаси, морозиво, кондитерські вироби, розширені снеки та крупи, дитяче харчування, сухі напівфабрикати тощо.

Технологія екструзії стає дедалі важливішою у харчовій промисловості для перетворення інгредієнтів у проміжні або готові продукти. Хоча її зазвичай асоціюють із гвинтом як транспортним механізмом, екструзія при високих температурах і тисках є, по суті, спеціалізованою формою безперервного екструдера [1, 2]. Екструдер унікальним обладнанням, що працює з відносно сухими матеріалами, пластифікує харчову масу, знижує мікробне навантаження, денатурує ферменти і найважливіше, текстує кінцевий продукт у бажану форму. Комбіновані операції можливі завдяки широкому діапазону змінних, контрольованих оператором, включаючи швидкість гвинта, профіль гвинта, температуру, вологість, швидкість подачі та розмір/форму фільери.

Потік у одношнековому екструдері розглядається як комбінація потоку зчеплення та потоку під тиском. Потік зчеплення виникає через в'язке зчеплення і пропорційний швидкості шнека, тоді як потік під тиском спричинений підвищеним тиском на фільері і протидіє потоку зчеплення. Цей механізм потоку пояснює сильну залежність роботи одношнекового екструдера від конструкції циліндра та тиску, що чиниться фільерою, що обмежує його гнучкість та робочий діапазон [2]. Змішування інгредієнтів у каналі шнека також обмежене, оскільки зазвичай існують умови ламінарного потоку, проте це можна мінімізувати за допомогою шнеків із розрізними лопатями та/або жолобчастого циліндра. Підвищення зворотного тиску за фільерою також може сприяти покращенню змішування. Одним з головних обмежень у одношнековому екструдері є нестабільність потоку (варіації масового потоку від фільери), що пов'язане з варіаціями коефіцієнта тертя маси, а також змінами її в'язкості.

Принцип роботи одношнекового екструдера заснований на зчепленні для здійснення транспортування сировини. Для перенесення твердого матеріалу необхідне зчеплення засноване на силі тертя, а для перенесення розплавленого матеріалу – в'язке зчеплення. Тому поведінка при транспортуванні значною мірою залежить від властивостей тертя твердого матеріалу та в'язкісних властивостей розплавленого матеріалу. Існує багато матеріалів, які не можуть бути екстродовані одnogвинтові екструдерами через несприятливі властивості тертя. Транспортування в взаємозчепленому двошнековому екструдері в певній мірі є транспортом типу позитивного зміщення [1, 2]. Ступінь позитивного зміщення визначається тим, наскільки добре лопатка одного шнека закриває канал іншого шнека. Найефективніший екструдер з позитивним зміщенням – це повністю зачіплюваний взаємозчеплений двошнековий екструдер з протилежним обертанням. Жоден екструдер не може бути чисто пристроєм з позитивним зміщенням, тому що машину на практиці неможливо побудувати без будь-яких зазорів. Таким чином, потоки зменшуватимуть ступінь позитивного зміщення в будь-якому двошнековому екструдері.

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

Головна різниця між одношнековим та двошнековим екструдером полягає в механізмі транспортування. Єдина сила в одношнековому екструдері яка утримує матеріал від обертання разом зі шнеком і, таким чином, забезпечує його просування – це тертя об поверхню циліндра. Отже, транспортування ґрунтується на силах тертя та в'язких силах, пов'язаних із масою. Тому форма поверхні стінки циліндра та співвідношення довжини циліндра до діаметра шнека (L/D) є важливими факторами при проектуванні одношнекового екструдера. За однакових умов екструзії тертя зростає зі збільшенням співвідношення площі поверхні до об'єму каналу і сприяє тяговій дії, так само як і наявність жолобчастої поверхні циліндра.

Всі багатошнекові екструдери походять від одношнекового екструдера. Перший одношнековий екструдер був винайдений приблизно 2250 років тому Архімедом. Одношнековий шнек, використаний як екструзійний апарат, був розроблений у другій половині 19 століття для промислового та важкого машинобудівного виробництва [1, 2]. Екструдери з подвійним гвинтом можна поділити на співобертові та протиобертові типи залежно від напрямку обертання гвинта. В свою чергу, вони можуть бути підрозділені на повністю взаємопроникні, частково взаємопроникні та невзаємопроникні гвинти. При цьому останні запобігають будь-якому виступанню одного гвинта в канал іншого. Кожна з цих категорій екструдерів з подвійним гвинтом має свої принципи роботи, функції та області застосування. Невзаємопроникний тип екструдерів працює в основному за тим самим принципом, що і одношнекові екструдери, де тертя сировини є основним фактором, який контролює механізм транспортування.

Екструдери з повністю взаємопроникними гвинтами мають геометричну конфігурацію, в якій матеріал замкнений у С-подібних камерах (відсіках), утворених двома гвинтами та циліндром. У системі з протилежним обертанням замкнені С-подібні камери мають малий обсяг, що запобігає витоку матеріалу з одного гвинта в інший [2]. Гвинти з однаковим напрямком обертання утворюють осьово відкриті канали та дозволяють обмін матеріалом уздовж машини. Поперечний переріз зони взаємопроникності показує різницю у відкритій площі між гвинтами для двох систем. Відмінності у формі витків і геометрії гвинтів призводять до різниці в експлуатаційних характеристиках цих двох груп машин. Відмінності пов'язані з транспортуванням, умовами роботи, продуктивністю, зсувними напруженнями, наростанням тиску, витоками, змішуванням, поведінкою потоку та розподілом часу перебування сировини.

Переплетення протилежних обертів двошнекових екструдерів з невеликими проміжками фактично утворює закриті канали, які мінімізують витік між каналами, зменшують змішування та розподіл часу перебування. За таких обставин виникають умови, близькі до потоку пробки, однак локальний тиск накопичується по всій верхній частині камер, де гвинти сходяться, що призводить до високих швидкостей зсуву та напружень. Напруження можуть спричинити зношування системи, притискаючи гвинти до ствола. Оскільки знос зростає пропорційно зі швидкістю гвинта, протилежні екструдери зазвичай працюють на нижчих обертах, що призводить до зниження пропускної

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

здатності для певного об'єму порожнечі [1, 2]. Внаслідок загального транспортного механізму велика частина матеріалу всередині каналів не піддається достатньому рівномірному зсуву для ефективної дисперсії. Переваги такої конструкції – хороша насосна дія, висока ефективність виходу та вузький розподіл часу перебування. Навпаки, її обмеження – погане змішування, низька пропускна здатність, низька однорідність продукту та сильно локалізовані напруження, що може призвести до коротшого терміну служби ствола. Для покращення змішування та мінімізації впливу високого локального тиску потрібно збільшити зазори.

Продуктивність екструдера можна покращити або зменшивши ширину робочого кінця жолоба і/або збільшивши зазор гвинта, однак такі зміни слід обмежувати лише зоною змішування та підтримувати вузькі зазори в зоні подачі. Екструдери з протилежним обертанням використовуються, коли потрібна висока позитивна конвеєрна дія, низькі загальні швидкості зсуву та вузькі розподіли часу перебування. Екструдери особливо корисні для обробки матеріалів з низькою в'язкістю, суспензій або швидкорозчинних цукрів.

У спільнообертових двошнекових екструдерах закриті камери не утворюються, а комбіновані канавки створюють проходи, що дозволяють матеріалу переміщуватися з каналу одного гвинта в канал іншого. Тому не виникає наростання тангенціального тиску і коли тиск високий для одного гвинта то він є низьким для іншого. Сам матеріал утримує гвинти в центрі бочки, що дозволяє використовувати невеликі зазори між гвинтами та бочкою, а також між самими гвинтами, що забезпечує їм самоочисну дію. При цьому немає зон локально високого зсуву, як у випадку з протилежно обертовими гвинтами, що знижує загальний знос машини [2]. Самоочисна дія гвинтів має практичне значення, оскільки запобігає прилипанню матеріалу до гвинта, що могло б призвести до пригорання термочутливого матеріалу. Крім того, самоочисна дія забезпечує більш однорідний профіль швидкості, що, у свою чергу, призводить до звуження розподілу часу перебування. Збільшення продуктивності та зниження швидкості гвинта може значно звужити розподіл швидкості, дозволяючи отримати більш рівномірні напруги зсуву та, як наслідок, покращити однорідність матеріалу. Натомість розподіли швидкості та зрізових напружень для системи з зустрічним обертанням є важливою функцією геометрії гвинта.

Даний тим екструдерів з самочишувальними гвинтами дозволяють значні обсяги зворотного підтікання вздовж гвинтів, тому ці екструдери мають нижчий ступінь позитивного конвекційного переміщення, але кращі змішувальні властивості. Потік мінімізує знос шнека/циліндра і дозволяє працювати з такими екструдерами на швидкостях до 500 об/хв [1, 2]. Переваги по транспортуванню матеріалів у екструдерів із зустрічним обертанням компенсуються високими швидкостями та продуктивністю, які забезпечують екструдери з односпрямованим обертанням. Загалом, екструдери з односпрямованим обертанням вважаються однією з найбільш корисних загальних екструзійних систем через їхню гнучкість, хороші змішувальні характеристики, знижене зношування, високі швидкості зрізу та

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

продуктивність.

Окрім напрямку обертання або ступеня зацеплення, гвинти можуть мати різну геометрію витків та глибину каналів, що додатково впливає на експлуатаційні характеристики двошнекового екструдера. Зазвичай гвинти складаються з секцій, які можуть виконувати конкретні функції, такі як подача, плавлення, змішування, нагнітання або зрізування. Традиційно екструдери вважалися такими, що мають три базові зони: подачі, плавлення та дозування, проте, змінюючи профіль гвинта, можна отримати нові комбіновані функції. Вибрана конфігурація гвинта може суттєво впливати на процес, стабільність процесу, споживання енергії та розподіл часу перебування матеріалу. Проте немає основних правил, які б гарантували вибір оптимального профілю гвинта за довжиною секції, розташуванням кожної функції або їхньою послідовністю.

1.3 Компоненти екструдера

Екструдер – це спеціалізований пристрій для екструзії. Він виконує одночасно кілька одиничних операцій, включно зі змішуванням, зсувом, желатинізацією крохмалю, денатурацією білків, текстуризацією, інактивацією ферментів, термічним приготуванням, пастеризацією, зневодненням, формуванням і зменшенням розміру. Екструдери складаються з таких основних частин – системи подачі, гвинта, ствола, штампа та механізму різання. Екструдери обираються на основі сировини та бажаної продукції [6, 7]. Екструдери відрізняються за формою, розміром і роботою: поршневі, роликові або гвинтові. Поршневі екструдери, найпростіші, використовують поршень або акумулятор для проштовхування матеріалу через сопло. Ідеальні для в'язких, чутливих до зсуву матеріалів, вони відкладають плумбу в кондитерських виробках. Роликові екструдери з барабанами, що обертаються навпроти, формують такі продукти, як крекери та печиво. Гвинтові екструдери, найскладніші, використовують обертові гвинти у стаціонарному стволі для транспортування матеріалу через штамп.

Екструдер зазвичай має систему подачі або зону подачі, яка транспортує сировину та систему матриці, яка формує матеріал у потрібну форму. Існують різні типи екструдерів, які мають спільну властивість, а саме – проштовхування екструдату з широкого перерізу через обмеження матриці за допомогою процесу, що починається з входу в матрицю. Різні типи екструдерів спрямовують екструдат із широкого поперечного перерізу через обмеження матриці. Необхідна сила та характеристики екструдату залежать від властивостей екструдату, конструкції матриці та швидкості, з якою матеріал проштовхується через матрицю.

Існує багато різних варіантів екструзійного обладнання. Вони відрізняються чотирма основними характеристиками, а саме [6]:

- рухом екструзії відносно штока;
- положенням гвинта: вертикальне або горизонтальне;
- типом приводу: гідравлічний або механічний;
- типом прикладеного навантаження, звичайне змінне або гідростатичне.

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

Для різних завдань використовують різні типи та розміри екструдерів. Розмір екструдера описується діаметром гвинта або циліндра, зазвичай від 15 до 250 мм та співвідношенням довжини циліндра до його діаметра. Екструзійна система або екструзійна лінія має кілька компонентів [6]:

- бункери для подачі та механізми для дозування потрібного відсотка сировини та інших інгредієнтів;
- екструдер для змішування сировини та інших інгредієнтів;
- систему фільтрації для видалення забруднень;
- перехідник для з'єднання екструдера з формою;
- форму для надання харчовій сировині потрібної форми;
- охолоджувальний механізм для надання сировині кінцевої форми.

Одношнекові екструдери мають одинокий обертовий гвинт у металевому стволі, доступний у різних схемах, при цьому загальна конструкція має постійний кут ухилу. Сировина у гранульованій формі подається через бункер у відсіку подачі. Обертання гвинта переміщує матеріал у перехідну секцію, де канал гвинта стає мілким, ущільнюючи матеріал. Відбувається значне механічне розсіювання енергії, що підвищує температуру матеріалу і спричиняє желатинізацію крохмалю, посилюючи згуртованість [7]. Матеріал проходить через дозувальний відсік, зрештою проштовхуючи через отвір кристала. Бочки одногвинтових екструдерів зазвичай мають гвинтові або осьові канавки на внутрішніх поверхнях для більш ефективного транспортування та змішування матеріалу (рис. 1.1). Категорії одногвинтових екструдерів включають екструдери з холодним формуванням (типу пасти), екструдери високого тиску, екструдери з низьким зсувом для приготування сировини.

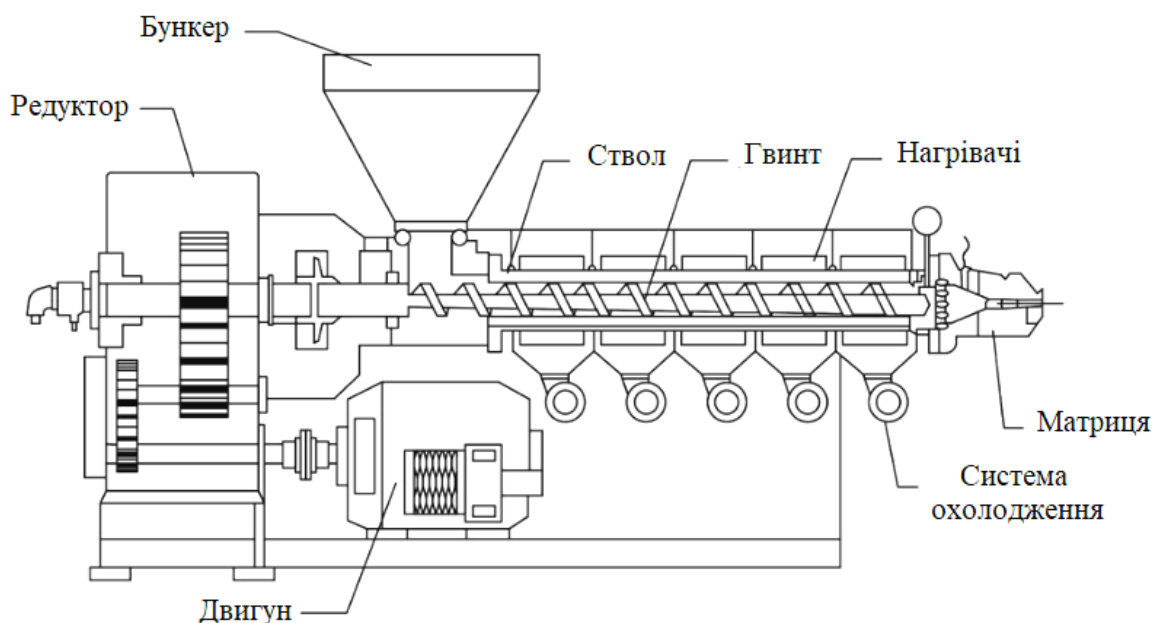


Рисунок 1.1 – Одношнековий екструдер

Одношнековий екструдер має циліндр та різні зони, які називаються зонами транспортування твердих часток, плавлення та подачі розплаву. Корпус в якому обертається гвинт, називається бочкою, яка буває двох типів:

біметалічна бочка та суцільна або розкривна бочка. Біметалічна бочка може витримувати більші тиски обробки, ніж розкривна бочка. Екструдер також оснащений сухими подавачами для подачі матеріалу в екструдер. Існують об'ємні та гравіметричні подавачі. Подавач розташований над секцією подачі у циліндрі над зоною подачі, щоб подавати сировину у бункер подачі. Ядром екструдера є гвинт екструдера, який складається з зони подачі, зони змішування та зони дозування [1]. Екструдер також має компоненти нагрівання та охолодження циліндра, вбудовані в сам циліндр. Нагрівання може здійснюватися за допомогою електричних нагрівачів. Охолодження циліндра досягається пропусканням холодної води через канали в циліндрі. Останнім компонентом екструдера є матриця. Матриця розташована на виході з екструдера, де вивантажується продукт і вони розроблені з обмежувальною функцією, щоб збільшити заповнення циліндра, час перебування та енергетичне ведення. У процесі екструзії тип ріжучого інструменту залежить від типу екструдованого продукту.

Подвійні гвинтові екструдери мають два паралельні гвинти однакової довжини, які обертаються всередині одного ствола, зазвичай з гладкою внутрішньою поверхнею. Складніші за одногвинтові екструдери, бо вони забезпечують більшу гнучкість і кращий контроль. Ці екструдери підходять для високовологих застосувань, продуктів з більшою кількістю компонентів, таких як волокна та жири, а також для більш складних продуктів [1, 7]. Подвійні гвинтові екструдери забезпечують універсальну роботу з в'язкими, олійними, липкими або вологими матеріалами з вмістом жиру до 25%. Вони відчують менший знос у менших деталях машини порівняно з одногвинтовими екструдерами. Крім того, вони мають широкий діапазон розмірів частинок – від дрібного порошку до зерен, на відміну від обмеженого асортименту одногвинтових екструдерів. Двошнековий екструдер можна розділити на такі секції: приводна секція, секція обробки, секція фільтри (рис. 1.2).

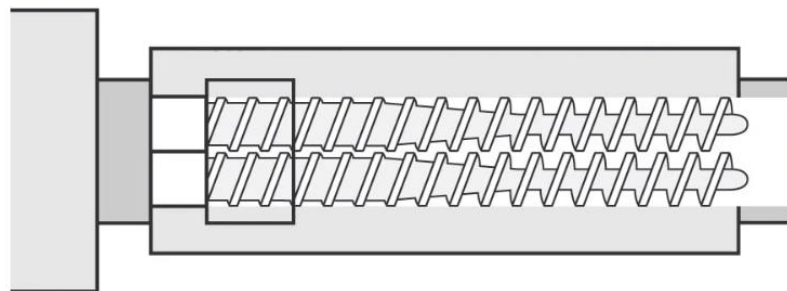


Рисунок 1.2 – Двошнековий екструдер

Кожна з цих систем відіграє важливу роль у функціонуванні машини. Спершу привідна система забезпечує енергією обробну ділянку. Обробна ділянка є серцем екструдера. Формувальна секція визначає, яким чином продукт виходить з машини. Охолоджувальна секція охолоджує та формує продукт, щоб наступні процеси після екструзії могли обробляти продукт.

1. Приводна секція. Привідний блок екструдера з двома гвинтами, що обертаються в одному напрямку розташований після секції обробки та є

найважливішим компонентом у системі. Привідний блок складається з двигуна, системи регулювання швидкості, механізму обмеження крутного моменту та редуктора. Екструдери використовуються для переробки харчових продуктів. Сировина плавиться, змішуються, гомогенізуються та вивантажуються з екструдера у вигляді гранул залежно від потрібної форми. Енергія, необхідна для переробки продуктів в екструдері, генерується механічним зсувом за допомогою модульного гвинта. Таким чином, найбільша частина енергії, необхідна для обробки продукту, забезпечується приводною системою.

Електродвигун передає крутний момент на редуктор, який, у свою чергу, надає потужність обробній секції. Крутний момент, необхідний для обробки певного продукту, залежить від пропускної здатності (швидкості виробництва), в'язкості продукту, швидкості гвинта тощо. З цієї причини привід екструдера потребує характеристику крутного моменту двигуна, яка забезпечує високий крутний момент у діапазоні низьких швидкостей до номінальної швидкості. Охолодження двигунів здійснюється за допомогою вентилятора, який проганяє повітря вздовж двигуна [9-11]. Вентилятор приводиться в дію валом двигуна, що призводить до того, що об'ємний потік повітря залежить від швидкості обертання. Під час екструзії двигун часто працює на низьких швидкостях, зменшуючи об'ємний потік, що може призвести до перегріву двигуна. Тому часто необхідне примусове охолодження двигуна, що можна досягти або встановивши окремий двигун, що приводить у дію охолоджувальний вентилятор, або охолоджуючи двигун за рахунок циркуляції води через водяний кожух, розташований навколо двигуна. На практиці примусове охолодження зовнішнім повітрям використовується частіше через нижчу вартість і простоту.

Енергія, необхідна для роботи всіх електродвигунів великої ємності, отримується з мережі змінного струму. Двигуни змінного струму можуть подаватися безпосередньо з мережі змінного струму, якщо вона працює на номінальних швидкостях. Якщо потрібна змінна швидкість, змінні двигуни оснащені частотним перетворювачем. Постійні двигуни також живляться від мережі змінного струму. Постійний двигун отримує живлення від перетворювача потужності, який може змінювати швидкість двигуна. Регульовані частотні приводи використовують змінний струменний індукційний двигун, підключений до твердотільного джерела живлення, здатного надавати регульовану частоту для двигуна [1, 9, 11]. Двигуни змінного струму мають певні переваги, такі як низька ціна, міцність, простота, відсутність комутаторів чи щіток тощо. Блок живлення перетворює змінний струм на постійний струм. Потім він інвертує постійний струм, використовуючи два набори твердотільних пристроїв у змінний струм з необхідною частотою. Перетворювач живлення генерує від трифазного основного живлення пульсуючу постійну напругу для постійного двигуна. Швидкість двигуна визначається кількістю генерованої постійної напруги, що можна змінити за допомогою тиристорного керування перетворювачем потужності.

Коробка передач двошнекового екструдера має дві основні функції:

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

зменшувати швидкість двигуна до робочої швидкості екструдера (редуктор) та розподіляти крутний момент на два суміжних вихідних вали (розподільна коробка передач). Редуктор знижує високу швидкість обертання приводу до низької швидкості гвинтів екструдера. Типові передатні числа редукторів значно варіюються, щоб відповідати вимогам процесу. Зубчасті колеса з косим зубом зазвичай використовуються в редукторі. Вони характеризуються низьким рівнем шуму, високою ефективністю та тривалим терміном служби. Тепло, що виникає в редукторі, зазвичай становить частину переданої потужності редуктора. Зубчасті колеса зазвичай змащуються за допомогою розбризкування або примусового змащування системою масляного насоса. Охолодження масла зазвичай здійснюється за допомогою вбудованого теплообмінника в редукторі або, у разі сильно навантажених редукторів, за допомогою систем з водяним охолодженням [1]. Коробка передач є необхідною для двогвинтового екструдера. Крутний момент має рівномірно розподілятися між двома вихідними валами. Два вали мають фіксовану центральну відстань (параметр дизайну гвинта екструдера), що створює кілька проблем під час проєктування коробки передач. Висока осьова сила в гвинтах екструдера спричинена тиском плавлення в штампі і повинна поглинатися тяговими підшипниками на вихідних валах коробки передач. Завдання полягає в тому, щоб розмістити достатньо міцний тяговий підшипник поруч із сусіднім валом. Коробки передач екструдерів зазвичай мають один великий сферичний роликівий опорний підшипник тяги на одному вихідному валу та осьовий опорний підшипник на іншому.

2. Секція обробки. Секція обробки є серцем екструдера, бо сировина подається в секцію обробки через вхідний отвір циліндра. Потім продукт переміщується набором гвинтів через камеру, що називається циліндром. Деякі параметри процесу, наприклад температура, ретельно встановлюються в певних місцях по всьому циліндру для правильного оброблення продукту. Продукт виходить з циліндра через форму або ножову пластину, залежно від того, який продукт виготовляється.

Функцією барабана полягає в тому, що він з'єднує секцію обробки з каркасом екструдера. Основна функція барабана полягає в розташуванні вставок, які формують камеру, в якій працюють шнеки. Він також формує охолоджувальну оболонку навколо вставок і містить нагрівальні елементи, які разом з охолоджувальними оболонками точно регулюють температуру процесу. Існують два типи бочок: бочка типу «ракушка» та суцільна бочка. Перевага бочки типу «ракушка» полягає в тому, що вона забезпечує легкий доступ до гвинтів. Бочку можна ослабити і відкрити для огляду та очищення [1, 9]. Недоліком бочкоподібного обладнання типу «ракушка» є те, що воно обмежене кількістю тиску, який можна застосувати в процесі. Усередині барабана температура контролюється для досягнення бажаних умов обробки при виробництві конкретного продукту. Барабан поділений на кілька незалежних зон контролю температури процесу, що забезпечує гнучкість у формуванні температурного профілю протягом процесу. Залежно від виготовленого продукту температурний профіль може бути зростаючим, спадним, рівним або

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

комбінованим. Контроль температури досягається шляхом подачі або відведення тепла. Тепло подається через електричне нагрівання, нагрівання рідини або паром. Електричне нагрівання має значні переваги порівняно з нагріванням рідини та паром. Воно може забезпечити значно більший температурний діапазон, його легше обслуговувати, чистити, воно економічне та ефективне. Тому в більшості випадків електричне нагрівання замінило нагрівання рідини та паром.

Електричні нагрівачі можна поділити на два типи: нагрівачі опору та індукційні нагрівачі. Нагрівачі опору широко використовуються, тому що їх легко замінити, вони доступні і відносно недорогі. Тривалість служби та ефективність, однак, залежать від якості контакту всієї поверхні нагрівача з матеріалом циліндра. Неправильний контакт може призвести до локального перегріву, що може викликати передчасний вихід з ладу. Індукційний нагрів здійснюється за допомогою змінного струму, який проходить через котушку, що оточує циліндр екструдера [1, 2]. Змінний струм створює змінне магнітне поле всередині циліндра з тією ж частотою, що у свою чергу, індукує електрорушійну силу в циліндрі, спричиняючи вихрові струми. Збитки циркулюючого струму відповідають за нагрівальний ефект. Перевагою цього типу нагрівання є значно зменшені температурні градієнти в циліндрі екструдера, оскільки тепло генерується рівномірно по всій глибині циліндра, на відміну від нагрівачів опору. Споживання енергії невелике через ефективний нагрів та зменшені тепловтрати. Також можливо встановити систему охолодження безпосередньо на поверхні циліндра, що дозволяє точно контролювати температуру.

Щоб підтримувати потрібний температурний профіль по всій довжині циліндра, також необхідно відводити тепло. Відведення тепла зазвичай здійснюється шляхом подачі стисненого повітря або охолодженої води через кілька отворів у кожній зоні або продування повітрям по циліндру. Кожен метод має свої переваги, а саме [1-5]:

- продування повітрям по циліндру є найменш витратним методом, додаткове обладнання не потрібне. Однак він менш ефективний і всередині циліндра легко можуть утворюватися гарячі зони, що погіршує якість екструзійного продукту;

- використання охолодженої води або стислого повітря через охолоджувальний кожух може усунути гарячі точки але потребує дорогого обладнання, такого як холодильні установки. Перевага стислого повітря над водою полягає в досягненні значно більш плавного температурного профілю через меншу теплопередачу повітря.

Основна концепція екструзії полягає в обробці матеріалу через перетворення механічної енергії на теплову енергію, що здійснюється за допомогою одного гвинта, пари гвинтів або двох і більше сегментованих гвинтових валів, які називають багатогвинтовими екструдерами. Таким чином, гвинти формують серце екструдера. Обертання гвинта транспортує сировину, забезпечує найбільшу кількість теплової енергії для продукту та викликає гомогенізацію, змішування і диспергування матеріалу. Геометрія тісно

взаємодіючих подвійних гвинтових екструдерів характеризується тим, що обидва сусідні профілі гвинтів мають однакову геометрію є симетричними та обертаються з однаковою швидкістю.

Профіль гвинта складається з трьох частин: вершини, боковини та основи. Вершина складається з дуги, діаметр якої дорівнює зовнішньому діаметру профілю екструзійного гвинта, а центр цієї дуги збігається з центром профілю. Край вершини переходить у сусідню бокову частину. Для гвинтів, які щільно очищають внутрішню частину циліндра, бокова частина складається з дуги, радіус якої дорівнює відстані між центрами [1-5]. Бокова частина переходить дотично в область основи, яка має діаметр серцевини гвинта, а центр кола збігається з центром профілю. Вершина очищає основу протилежного гвинта і навпаки, а кут профілю між вершиною і боковиною очищає протилежну бокову частину. Переміщення матеріалу здійснюється шляхом розширення гвинта в третій вимір через гвинтове обертання. Кожен елемент гвинта має постійний крок, а варіації кроків по всьому гвинту досягаються за рахунок використання різних типів елементів. На рисунку 1.3 показано два елементи гвинта, які мають різний крок.

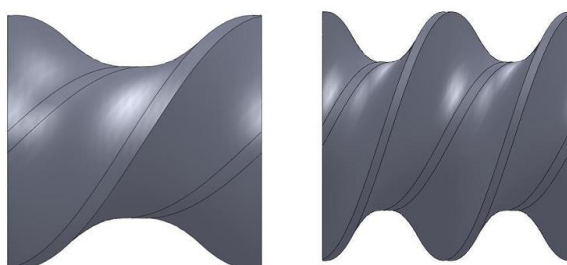


Рисунок 1.3 – Гвинта з різним кроком

Модульний шнек екструдера складається з набору елементів шнека, що включають: шнеки подачі, змішувальні елементи та елементи стиснення. Кожен елемент має свою функцію і в різних комбінаціях та послідовностях він дозволяє всьому гвинту виконувати своє обробне завдання.

Шнеки подачі або транспортувальний шнек зазвичай має великий крок і довжину, а його довжина становить кілька діаметрів шнека; кроки можуть варіюватися, але нормою є крок у декілька діаметрів. Характерною особливістю шнеків з великим кроком є швидка транспортувальна дія і низький тиск на продукт. Ці елементи зазвичай використовуються в зоні подачі циліндра, де вони транспортують продукт у циліндр до першої стадії обробки. В залежності від потреб продукту, шнек з великим кроком може застосовуватися пізніше в процесі, коли необхідне зниження тиску для дегазації продукту [1, 9, 11]. Змішувальні елементи використовуються для змішування матеріалів. Зазвичай ці елементи складаються з кількох змішувальних дисків, які мають такий же профіль, як і профіль самоочищувальних елементів гвинта. Елементи з широкими дисками забезпечують великий рівень зсуву продукту, тоді як елементи з тоншими дисками сприяють змішувальним властивостям змішувальних елементів. Елементи передають більшість механічної енергії від обертання гвинта до продукту через механічний зсув. Елементи стискання – це елементи з кроком, коротшим за їхню довжину. Характеристика такого елемента полягає в тому, що він зменшує швидкість потоку і збільшує

тиск на продукт та використовуються для того, щоб уповільнити продукт, забезпечуючи кращу заповнюваність ствола в обробних зонах, що, у свою чергу, підвищує ефективність конкретної ділянки. Для виробництва продуктів харчування конструкція отвору штампа визначає спосіб розширення продукту. Зменшення діаметра призводить до розширення продукту в радіальному напрямку, а довжина ділянки сприяє загальному розширенню. Після розширення продукт ріжеться на бажану довжину за допомогою різача, що рухається перпендикулярно до напрямку екструзії на поверхні штампа.

1.4 Змінні процесу та контроль процесу екструзії

Екструзія – це процес при якому сировина витягується в бочку обертовим транспортним валом. Всередині бочки матеріал пластифікується за допомогою механічного зрізу. Потім його ретельно змішується та гомогенізується. Залежно від того, яким чином продукт повинен виходити з екструдера, матеріал може або видавлюватися з бочки під низьким тиском або під дією тиску продукт може бути витиснутий у потрібну форму, наприклад, для виготовлення макаронних виробів різної форми [1, 2, 14]. Проте якість екструдатів легко піддається впливу змінних процесу екструзії, тому всі умови процесу потребують належного контролю, регулювання та керування. Після визначення оптимальних умов для продукту ці умови слід підтримувати, щоб забезпечити стабільну якість продукту. Пакетні процеси на відміну від безперервних процесів, більше покладаються на покрокову оцінку для контролю таких характеристик продукту, як смак, колір і текстура і тому не придатні для швидкої реакції на зміни в змінних продукту або процесу. Як безперервний процес, екструзійне приготування має потенціал для автоматизація та керування зворотним зв'язком, які успішно використовувалися у екструзії і могли б покращити як якість продукції, так і вихід. Більш складні прилади та системи керування процесами інтегруються у двошнекові екструдери за мірою ускладнення застосувань.

Процесні змінні, які можна контролювати під час екструзії, зазвичай називають незалежними або контрольними змінними і включають: швидкість шнека, швидкість подачі, додавання води та/або пари, температуру в циліндрі та швидкість різця. Сучасний двошнековий екструдер повинен бути оснащений приладами для вимірювання та контролю цих змінних. Крім цих змінних, можна також враховувати змінні конструкції екструдера, такі як конфігурація шнека, розмір і форма матриці, довжина та діаметр циліндра (L/D) [2]. Як процесні змінні так і змінні конструкції екструдера можуть значно впливати на системні змінні, які, у свою чергу, називаються залежними змінними або змінними відгуку, пов'язаними із системою, і які можуть включати профіль температури продукту, тиск на матриці, крутний момент та ступінь заповнення шнека. Останній набір змінних, який називають допоміжними змінними, також потребує уваги, і його можна підрозділити на характеристичні ознаки продукту або економічні змінні відгуку. Залежно від процесу, що досягається, необхідно

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

визначити бажані цільові змінні та оптимізувати їх. Продуктивність екструдера зазвичай аналізується з точки зору пропускної здатності, енергоспоживання, поведінки потоку та функції часу перебування сировини і цю інформацію слід отримати для глибокого розуміння процесу. Лише процесні та системні змінні (за винятком ступеня заповнення) екструзійної системи можна контролювати з будь-яким рівнем легкості. Моніторинг цих змінних важливий не лише для виявлення будь-яких коливань у системі під час роботи, але й, крім того, ці змінні можна використовувати для вдосконалення процесу, оцінки роботи екструдера та прогнозування якості наступного продукту.

Пропускна здатність зазвичай визначається шляхом зважування вихідного матеріалу протягом деякого дискретного інтервалу часу під час стабільної роботи. Безперервний контроль також можливий за допомогою датчика, вагового ременя або тахометра. Генерація пари в циліндрі є поширеною проблемою у процесах екструзії при високих температурах і може призводити до хаотичних коливань характеристик процесу, продуктивності та якості продукту. Наприклад, використання лопатей зазвичай призводить до таких проблем, які можна подолати шляхом або збільшення ступеня заповнення шнека або вставляння шнеків-помп перед зоною лопатей, щоб вони діяли як паровий замок. Експлуатаційну стабільність екструдера можна підвищити шляхом [24-26]:

- зменшення витрат роботи (за рахунок збільшення вологовмісту суміші для подачі або зниження швидкості гвинта);
- зменшення співвідношення довжини порожнини матриці до довжини зони зрізу;
- зменшення опору матриці шляхом збільшення площі отвору матриці або зменшення довжини прилягання.

На основі вище зазначеного можна вважати, що екструзія – це безперервний або напівбезперервний процес формування сировини у однорідну форму шляхом витискання через форму під контрольованими умовами. Така форма або продукт постачається з високою продуктивністю. У процесі екструзії сировина може мати різні форми, розміри та типи залежно від призначення готового виробу. Екструзійний процес – це термічний метод обробки, що застосовує високу температуру, тиск і зсувну силу на сирі маси, отримуючи широкий спектр харчових продуктів, таких як закуски, готові до вживання пластівці, кондитерські вироби, продукти для відлучення, хрусткий хліб.

Процес екструзії може проводитися гарячим та холодним способом. Гаряча екструзія передбачає нагрівання сировини вище 100⁰С, використовуючи фрикційне нагрівання для швидкого підвищення температури. При холодній екструзії харчові матеріали нагріваються нижче 100⁰С, задля підтримки температури для формування та змішування різних продуктів, таких як тісто, м'ясо та паста. Екструдери обираються на основі сировини та бажаної продукції. Екструдери відрізняються за формою, розміром і роботою: поршневі, роликові або гвинтові. Гвинтові екструдери, найскладніші, використовують обертові гвинти у стаціонарному стволі для транспортування матеріалу через штамп і можуть мати один чи декілька гвинтів.

РОЗДІЛ 2

УДОСКОНАЛЕННЯ ШНЕКОВОГО ЕКСТРУДЕРА З ІНТЕГРОВАНОЮ СИСТЕМОЮ ОХОЛОДЖУВАЛЬНИХ РОЛИКІВ

2.1 Теплові та механічні властивості екструдерів

Глобальний попит на доступні та збалансовані за поживними речовинами продукти продовжує зростати, що призводить до стрімких інновацій у технологіях переробки харчових продуктів. Серед них приготування методом екструзії стало одним із найбільш трансформаційних способів виробництва готових до вживання продуктів, таких як закуски, сніданкові каші, білкові добавки та дитяче харчування. Екструзія поєднує змішування, зсув, приготування, формування та сушіння в безперервний, енергоефективний процес, виробляючи продукти з тривалим терміном зберігання, покращеною мікробіологічною безпекою та бажаними сенсорними характеристиками.

Однією з ключових переваг екструзії є її здатність контролювати структурні та функціональні властивості продукту – такі як коефіцієнт розширення, об'ємна щільність, показник водопоглинання та показник водорозчинності шляхом тонкого регулювання температури циліндра, швидкості гвинта, вологості сировини та конфігурацію гвинтів. У межах технологій екструзії двогвинтова екструзія здобула популярність над одногвинтовими системами завдяки своєму відмінному змішуванню, гнучкості та керованості. Системи дозволяють здійснювати модульне розташування гвинтових елементів. Адаптивність дозволяє виробникам вирішувати технічні виклики, пов'язані з сумішами, багатими на білок і клітковину, де розширення зазвичай нижче та щільніше текстура порівняно зі снеками на основі крохмалю. Управління тепловим режимом відіграє вирішальну роль у роботі екструдерів, особливо при обробці поживних сумішей, що складаються з зернових, бобових та рослинних композитів [2, 12]. Тепловий вплив визначає ступінь желатинізації крохмалю, денатурації білків та інактивації антипоживних факторів, а також впливає на текстуру продукту, його розширення та збереження поживних речовин. На відміну від одношнекових систем, двошнекові системи пропонують багатозональний нагрів бочки та незалежний контроль температури, що дозволяє точно налаштовувати тепловий профіль відповідно до рецептури. Неправильне теплове проєктування може призвести до неповного приготування матриць, деградації поживних речовин або поганих характеристик розширення, що підкреслює необхідність оптимізації стратегій нагрівання.

Типовий барабан двошнекового екструдера поділяється на послідовні зони: завантаження, змішування, термообробки та головки-формування.

					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>Єрмілко</i>				Удосконалення шнекового екструдера з інтегрованою системою охолоджувальних роликів	<i>Лім.</i>	<i>Арк.</i>
<i>Перевір.</i>	<i>Омельченко</i>						
						22	18
<i>Н. Контр.</i>	<i>Омельченко</i>					ННІЕТ КНУ Кафедра ЗІДО	
<i>Затверд.</i>	<i>Цвіркун</i>						

Кожен розділ оснащений незалежними нагрівальними елементами та термопарами, що дозволяє регулювати температуру локально. У харчовій екструзії температура барабана зазвичай коливається між 90°C та 190°C, залежно від рецептури та бажаних характеристик кінцевого продукту. Помірне нагрівання в зонах завантаження та змішування запобігає передчасній желатинізації, тоді як вищі температури в зонах термообробки та головки забезпечують перетворення крохмалю, знищення мікроорганізмів та розширення продукту.

Загальне теплове навантаження при екструзії виникає з двох джерел: зовнішнього нагрівання (через картриджні або стрічкові нагрівачі) та внутрішнього тепла, що генерується за рахунок в'язкісного дисипування і зсуву всередині матеріалу. Баланс між цими механізмами залежить від швидкості гвинта, геометрії елементів гвинта і вологості у подачі [12]. При вищих швидкостях гвинта внутрішнє тертя може забезпечувати до 70% загальної теплової подачі, зменшуючи залежність від зовнішніх систем нагріву. Однак надмірний зсув може призвести до локального перегріву та деградації поживних речовин, особливо у формулах, багатих на білок та клітковину. Сучасні екструдери тепер інтегрують термічні системи з керуванням за зворотним зв'язком, які постійно регулюють зовнішнє нагрівання, доповнюючи тепло, що генерується внутрішнім зсувом, забезпечуючи теплову стабільність по всій довжині циліндра.

Індекс розширення є ключовим параметром якості при екструзії снєків, відображаючи ступінь розпушення та пористість продукту. Помірні температури циліндра (110–140°C) при низькій вологості сировини (~14%) пов'язані з високими значеннями EI (>3,5), особливо в рецептурах на основі рису та кукурудзи. Натомість робота при підвищених температурах (160–190°C) часто призводить до зменшення розширення (EI < 1,0) через надмірне руйнування крохмалю та зниження в'язкості розплаву. Оптимізація зонового нагрівання є надзвичайно важливою для збереження розширення при мінімізації теплового пошкодження [2, 12]. Об'ємна густина обернено пропорційно пов'язана з індексом розширення і є ще одним важливим показником якості продукту. Нижчі значення (0,2–0,3 г/см³) бажані для легких, хрустких закусок, тоді як високі індекси (>0,8 г/см³) свідчать про щільніші та менш смачні продукти. Температура бочки сильно впливає на об'ємну густину: помірний нагрів (130–140°C) сприяє розширенню та зменшенню густини, тоді як вищі температури (>160°C) збільшують об'ємну густину через руйнування крохмалю та погану стабільність бульбашок. Ефективне управління температурою, у поєднанні з оптимальною швидкістю гвинта та вологістю подачі, забезпечує продукти з низькою об'ємною густиною та бажаною текстурою.

Механічна конструкція двошнекових екструдерів є ключовою для їх продуктивності, ефективності та універсальності у переробці різних харчових продуктів. На відміну від одношнекових екструдерів, де конструкція є відносно обмеженою, двошнекові екструдери забезпечують модульність у розташуванні шнекових елементів, розподілі крутного моменту та зонуванні циліндра. Ці

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

конструктивні рішення безпосередньо впливають на транспортування матеріалу, ефективність змішування, прикладання зсуву, розподіл часу перебування сировини і, в кінцевому рахунку, на характеристики продукту, такі як індекс розширення, об'ємна щільність та збереження поживних речовин. Щоб досягти як стабільності процесу, так і якості продукту, необхідно забезпечити баланс геометрії, швидкості, крутного моменту та зносостійкості матеріалу в механічній конфігурації екструдера. Гвинтова геометрія є основою механіки екструзії. Модульність гвинтової геометрії таким чином забезпечує гнучкий простір для налаштування обробки зернових, бобових або композитних сумішей. Гвинтові елементи модульні і можна загалом класифікувати як [12]:

- транспортні елементи, які транспортують сировину вперед з мінімальним змішуванням;
- змішувальні блоки, які застосовують інтенсивний зсув для змішування та розсіювання;
- реверсні елементи, які створюють локалізований зворотний тиск, покращуючи термічну та механічну обробку.

Швидкість гвинта: діапазони, крутний момент і ефекти зрізу. Швидкість гвинта є важливим параметром екструзії. Типові двошнекові екструдери для харчових застосувань працюють у діапазоні 100–600 об/хв. На нижчих швидкостях час перебування збільшується, що забезпечує кращу теплову рівновагу, але обмежує потенціал розширення. У той же час вищі швидкості скорочують час перебування, але створюють значне в'язке зрізове нагрівання. Механічний крутний момент зростає як зі швидкістю, так і з опором обробленого матеріалу. Крутний момент є критично важливим не лише для прогнозування енергоспоживання, а й для оцінки механічної міцності гвинтів і коробок передач [2, 12]. Надмірний крутний момент може призвести до передчасного зносу гвинта або навіть деформації валу, якщо його не спроектувати належним чином. Швидкість зсуву, безпосередньо пов'язана зі швидкістю гвинта, має подвійний ефект: вона покращує желатинізацію крохмалю та денатурацію білків, але також може розкласти чутливі поживні речовини та зменшувати розширення при надмірному підвищенні. Тому сучасні екструдери оснащені приводами змінної частоти, що дозволяє динамічно регулювати швидкість гвинта для балансування інтенсивності зсуву та теплового навантаження.

Крок елементів гвинта відноситься до осьової відстані за яку шнек завершує один оберт. Більший крок сприяє переміщенню матеріалу вперед із мінімальним стисненням, тоді як зменшений крок збільшує час перебування та внутрішній тиск. Аналогічно, глибина каналу контролює об'ємну ємність: глибші канали дозволяють більш високий пропускний потік, але зменшують зріз, тоді як дрібніші канали збільшують інтенсивність зрізання за рахунок пропускної здатності. Оптимізація кроку та глибини каналу особливо важлива при роботі з поживними сумішами. Наприклад, суміші сої та кукурудзи потребують дрібніших каналів і коротшого кроку для досягнення достатнього змішування та розширення, тоді як закуски на основі крохмалю можуть

використовувати глибші канали для ефективного транспортування. Необхідно проєктують гвинти з поступовим зменшенням глибини каналу вздовж барабана, щоб поступово збільшувати стиснення та зрізання матеріалу при наближенні до зон нагрівання та різання.

Відношення довжини до діаметра екструдера, зазвичай у межах від 20:1 до 40:1, є ще одним визначальним параметром конструкції. Більше відношення L/D збільшує час перебування матеріалу в барабані, сприяючи рівномірному змішуванню та ретельній термічній обробці. Проте занадто велике відношення L/D підвищує споживання механічної енергії та створює більший крутний момент на приводних компонентах [12]. Крім того, триваліший час перебування може спричинити деградацію поживних речовин у термочутливих сумішах. Навпаки, коротше відношення L/D може не забезпечити належного змішування, що призводить до неоднорідної текстури та неповного приготування. Тому оптимальний баланс L/D визначається залежно від продукту: коротші відношення для запечених зернових снєків та довші для білкових або багатих на волокна сумішей.

Барабан зазвичай поділяється на функціональні зони:

1. Зона подачі – великі кроки, глибокі канали для забезпечення стабільного надходження матеріалу.
2. Зона стиснення/змішування – зменшений крок і мілкіші канали для прикладання зрізу та сприяння желатинізації крохмалю або розгортанню білків.
3. Зона нагрівання – середовище з високою температурою
4. Зона подачі та фільтра – контрольоване наростання тиску для забезпечення стабільної форми та розширення.

Кожна зона механічно сконфігурована з використанням різних гвинтових елементів для досягнення певних цілей. Наприклад, у зоні змішування розміщуються місильні блоки, тоді як перед формувальною матрицею можуть додаватися зворотні елементи для стабілізації тиску. Така зональна конструкція забезпечує ефективну обробку матеріалу та запобігає проблемам, таким як ривки, неповне приготування або надмірний тиск на матрицю [2, 12]. Знос гвинта змінює геометрію, зменшує ефективність транспортування та порушує розподіл крутного моменту. Найпоширеніші матеріали для виготовлення гвинтів включають нітровано сталі, інструментальні сталі та загартовані сплави. У умовах високого абразивного зносу використовуються гвинти з покриттям з карбіду вольфраму або біметалічні для подовження терміну служби. Найсильніший знос спостерігається в зонах замішування, де зосереджено високі зсувні навантаження. Стратегії профілактичного обслуговування включають періодичний контроль крутного моменту, інспекцію елементів гвинта та заміну до перевищення критичних меж зносу. Вибір матеріалу стосується не лише зносостійкості, а й відповідності стандартам безпеки харчових продуктів. Сплави повинні відповідати харчовим стандартам, щоб уникнути забруднення.

Досягнення в мехатроніці змінили механічне керування екструдерами. Сучасні екструдери оснащені датчиками крутного моменту, перетворювачами тиску та моніторами навантаження двигунів, які надають дані в режимі

					ННІЕТ КНУ.133.ГМБ-22.2026.ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		25

реального часу про умови процесу. Датчики крутного моменту, зокрема, є цінними для прогнозування зносу гвинта, виявлення аномального опору матеріалу та підтримки безпечних умов експлуатації. Інтеграція систем ПЛК (програмованого логічного контролера) дозволяє автоматично регулювати швидкість гвинта, подачу матеріалу та нагрів циліндра на основі даних крутного моменту та тиску [2, 12, 14]. Це зменшує залежність від оператора та забезпечує стабільну якість продукції. Системи передбачуваного обслуговування тепер аналізують коливання крутного моменту з часом для прогнозування прогресування зносу, що дозволяє замінювати елементи гвинта до їх відмови. Системи керування не лише підвищують механічну надійність, але й оптимізують енергоефективність шляхом динамічного балансування зовнішнього нагріву та внутрішнього нагріву, викликаного зсувом. Узагальнення вхідних, вихідних та системних змінних, які пов'язані з процесом екструзії наведено на рисунку 2.1.

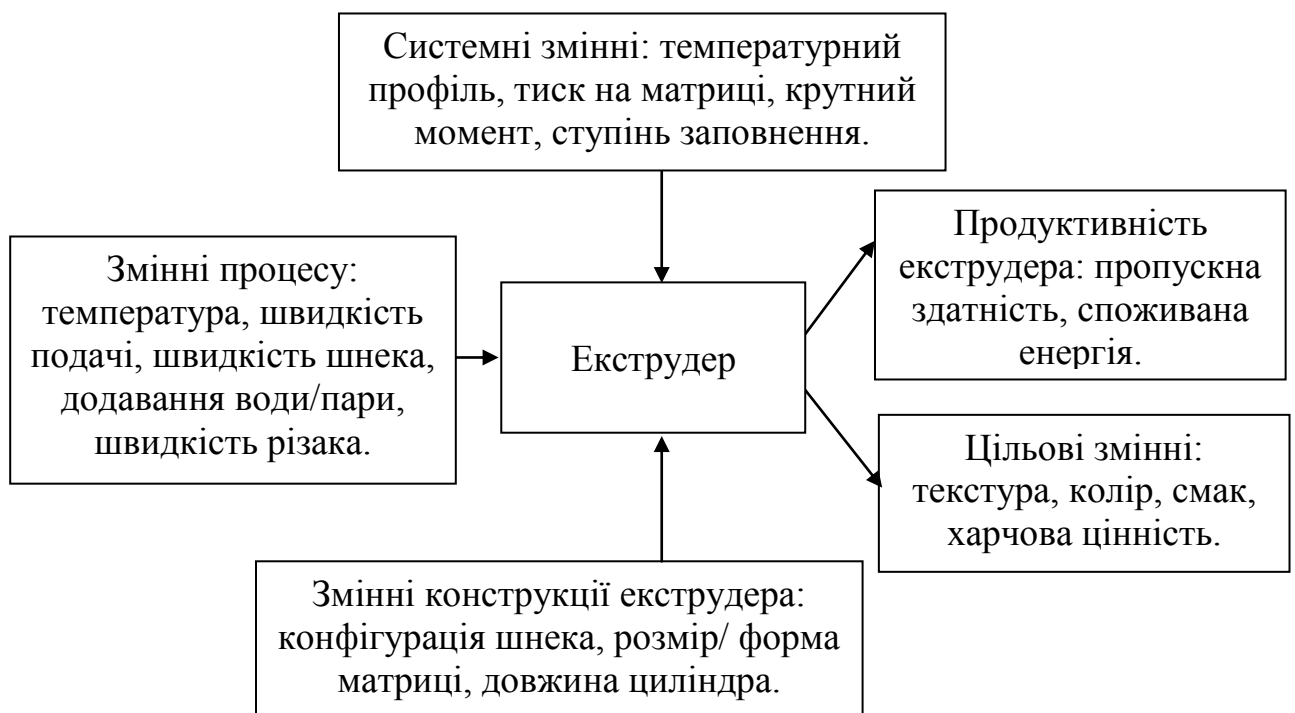


Рисунок 2.1 – Узагальнення вхідних, вихідних та системних змінних, які пов'язані з процесом екструзії

Системні змінні: температурний профіль, тиск на матриці, крутний момент, ступінь заповнення.

Змінні процесу: температура, швидкість подачі, швидкість шнека, додавання води/пари, швидкість різача.

Змінні конструкції екструдера: конфігурація шнека, розмір/ форма матриці, довжина циліндра.

Продуктивність екструдера: пропускна здатність, споживана енергія.

Цільові змінні: текстура, колір, смак, харчова цінність.

На основі вище зазначеного можна вважати, що екструзійне приготування – це багатофакторний процес, де невеликі зміни вологості,

швидкості гвинта, температури та співвідношення інгредієнтів можуть призводити до значних змін у якості кінцевого продукту. Основні характеристики, такі як індекс розширення, об'ємна щільність, індекс водопоглинання, індекс водорозчинності та специфічна механічна енергія, сильно залежать від оптимізації параметрів процесу. Процесні змінні, які можна контролювати під час екструзії, зазвичай називають незалежними або контрольними змінними і включають: швидкість шнека, швидкість подачі, додавання води та/або пари, температуру в циліндрі та швидкість різця. Сучасний двошнековий екструдер повинен бути оснащений приладами для вимірювання та контролю цих змінних.

2.2 Проектування основних компонентів екструдера

Екструзія має унікальну можливість, яка називається масштабуванням екструзії. Масштабування – це процес, при якому параметри на одному екструдері (і його розмірі) фіксуються і переносяться на інший екструдер, отримуючи той самий результат (продукт). Щоб екструдер був придатний для точного масштабування, він має бути спроектований таким чином, щоб максимально відповідати стандартному промисловому екструдеру для цього конкретного розміру [1]. Існують деякі ключові компоненти, які були спроектовані та визначені відповідно до промислових стандартів, такі як розмір привідного мотора екструдера, відстань між центрами гвинтів, діаметр гвинта, співвідношення довжини гвинта до діаметра та кількість зон нагрівання-охолодження.

Гвинтові екструдери – це машини, які складаються з двигуна та варіатора швидкості для регулювання обертання шпинделя, гвинт обертається всередині зовні нагрітого рукава. Сировина постійно подається з бункера, розташованого над корпусом, матеріал проходить через лійку до циліндра і по мірі просування нагрівається, змішується та стискається і, коли досягає формованої консистенції проходить через сопла або формуючий отвір. Шнековий екструдер має три секції, через які матеріал транспортується до виходу з машини після набуття бажаної форми.

Привідний блок забезпечує механічну потужність для обробного відділення. Вкрай важливо, щоб привідний блок міг забезпечити необхідну потужність для обробного відділення при максимальній потужності. Потужність обмежується геометричними обмеженнями, такими як максимальні діаметри валів, відстані між центрами гвинтів, розміри підшипників тощо. Використання змінного струму має набагато більше переваг ніж привід постійного струму [1, 15]. Двигун живиться від частотного перетворювача, що дозволяє екструдеру працювати на відповідних швидкостях. Мотор-редуктор використовують у поєднанні з розподільником передач. Розподільник передач спроектований відповідно до конфігурації блокового редуктора, де крутний момент від редукторного вузла розподіляється на два суміжні вали. Така конструкція негативно впливає на коефіцієнт редукції через геометричні обмеження. Тому необхідно компенсувати це при виборі мотор-редуктора.

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

Обертова швидкість електродвигуна

$$\omega = \frac{F \times 120}{U}$$

де f – частота змінного струму;
 U – кількість полюсів двигуна.

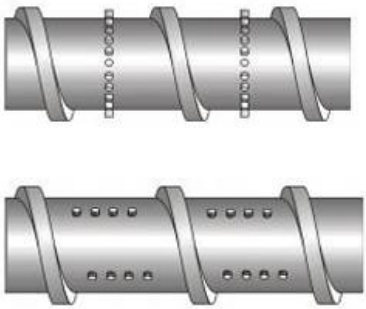
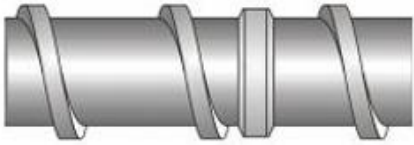
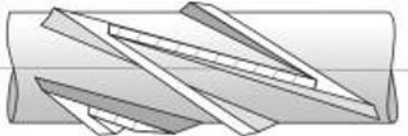
Обертова швидкість електродвигуна, об/хв

$$\omega = \frac{50 \times 120}{4} = 1500$$

Необхідне використання твердотілого джерела живлення з трифазним електродвигуном змінного струму, що буде найекономічнішим варіантом. Він не лише широко доступний, але й потребує мінімального обслуговування.

Можливість розробляти та створювати різноманітні профілі гвинтів забезпечує здатність проектувати та виробляти різні типи робочих елементів, що дозволяє змінюючи конфігурацію гвинта здійснювати оптимізацію продуктивності екструзійного обладнання.

Таблиця 2.1 – Типи шнека [16, 15]

Тип	Характеристика	Зображення
Змішувач з голками	Складається з серії голок або «шпильок», які розташовані на гвинті і можуть мати різні форми та розміри.	
Кільцевий змішувач	Складається з кільця на гвинті, утворюючи невеликий прохід.	
Змішувач з неодномірною формою	Глибина кроку змінна, розподіляючи та перенаправляючи матеріал у всій зоні дозування.	
Змішувач з додатковими секціями	Складається з декількох додаткових секцій, які діють як бар'єр між основними різьбовими витками гвинта, які вони мають нерівну висоту.	

Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

ННІЕТ КНУ.133.ГМБ-22.2026.ПЗ

Арк.

28

Для здійснення конструкцій було враховано механічні характеристики компонентів екструдера. Вільний простір між зовнішнім периметром гвинта та внутрішнім периметром циліндра повинен був бути достатнім для забезпечення вільного руху гвинта та, одночасно, не дозволяти витoku рідкої сировини з метою створення тиску. Водночас ці компоненти повинні були бути виготовлені з матеріалів, коефіцієнт розширення яких дозволяє зберігати механічні регулювання руху. Геометрична конфігурація шнека залежить, перш за все, від матеріалу, що оброблюється, у нашому випадку, харчова сировина. Тому шнек буде складатися з трьох точно визначених зон, довжини яких відповідають: подачі, стиснення та дозування.

Зона подачі поділяється на дві частини: спочатку речовина транспортується через бункер, а потім направляється до циліндра. Подача відбувається завдяки впливу гравітації на частинки, які рухаються до нижньої частини бункера. У цей момент матеріал знаходиться в твердому стані, і потік матеріалу обмежується конструкцією бункера. Мета полягає у створенні масового потоку, в якому немає застійних зон, і весь матеріал рухається всередину циліндра, запобігаючи його затримці на стінках бункера або в зоні подачі [15-17]. Важливо, щоб постачання матеріалу перевищувало споживання машини, щоб уникнути нестабільності процесу екструзії. У другій частині матеріал перестає контролюватися гравітацією і переноситься шляхом зрушення, що відбувається в циліндрі після надходження матеріалу через зону подачі. Ця секція розташована на початку гвинта, а її довжина залежить від конструкції гвинта.

Знаходимо площу зони подачі [15-17]

$$A = \pi \times r^2$$

$$A = 3,1416 \times 0,01^2 m$$

$$A = 3,1416 \times 10^{-4} m^2$$

Знаходимо об'єм зони подачі

$$V_1 = A \times L$$

$$V_1 = 3,1416 \times 10^{-4} m^2 \times 0,320 m$$

$$V_1 = 1,0053 \times 10^{-4} m^3$$

Зона транспортування забезпечує співіснування матеріалу у двох станах, спочатку він є твердим, оскільки переходить із зони подачі у зону плавлення з напрямком до насадки. У цьому процесі плавлення почнеться внаслідок тепла, проведеного від поверхні циліндра, а також за рахунок тертя вздовж поверхонь циліндра та шнека. Ця дія призводить до того, що матеріал плавиться і утворює плівку полімеру на поверхні циліндра, яка зростатиме, доки її товщина не зрівняється з радіальним зазором між циліндром та профілем шнека [15-17].

Оскільки матеріал під розплавленою плівкою перебуває у твердому стані, процес переносу тепла є повільним. Внаслідок руху шнека виникає градієнт швидкості між твердим шаром і поверхнею циліндра, що призводить до того, що однорідна сировина починає текти до профілю шнека

Знаходимо об'єм зони транспортування [15-17]

$$V_2 = \frac{\pi}{3} \times h(r^2 + r \times R + R^2)$$

$$V_2 = \frac{3,1416}{3} \times 0,192m(0,01^2m + (0,01m \times 0,0141m) + 0,0141^2m)$$

$$V_2 = 8,843 \times 10^{-5} m^3$$

Зона дозування діє як насос, у якому переміщення розплавленого матеріалу до насадки відбувається внаслідок обертання гвинта та його гвинтової конфігурації. Зона починається після завершення плавлення, тут глибина каналу є однаковою, оскільки сировина має бути повністю розплавленою, бо в іншому випадку повітря видаляється значно важче і залишається у розплаві, що спричиняє нестабільність екструзії.

Знаходимо площу зони дозування

$$A = \pi \times r^2$$

$$A = 3,1416 \times 0,0141^2m$$

$$A = 6,2458 \times 10^{-4} m^2$$

Знаходимо об'єм зони дозування [15-17]

$$V_3 = A \times L$$

$$V_3 = 6,2458 \times 10^{-4} m^2 \times 0,128m$$

$$V_3 = 7,9946 \times 10^{-5} m^3$$

Після отримання трьох значень об'єму отримає значення загального об'єму гвинта

$$V = V_1 + V_2 + V_3$$

$$V = 1,0053 \times 10^{-4} m^3 + 8,843 \times 10^{-5} m^3 + 7,9946 \times 10^{-5} m^3$$

$$V = 2,6891 \times 10^{-4} m^3$$

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

2.3 Системи нагрівання та охолодження в екструдері

Як відомо з процесу екструзії, температура є однією з необхідних умов для процесу екструзії і система нагрівання та охолодження екструдера налаштована так, щоб забезпечити цю необхідну умову. Існує два джерела тепла для сировини під час екструзії. Одна – це тепло, що подається зовнішнім нагрівачем ствола, а інша – тепло тертя, що виникає внаслідок відносного руху між пластиком і внутрішньою стінкою ствола, пластиком і гвинтом, а також сировиною [13, 19-21]. Перша частина тепла перетворюється електричною енергією нагрівача, а друга частина тепла перетворюється механічною енергією, передана двигуном гвинту. Розмір теплового коефіцієнта цих двох частин пов'язаний із гвинтом, структурою ствола, умовами процесу, природою матеріалу тощо, а також із етапом екструзії (наприклад, етапом запуску, стадією стабільної роботи). Екструдер має систему охолодження (разом із системою нагрівання), яка забезпечує екструзію сировини при температурі, що необхідна для процесу. У процесі екструзії тепло тертя, яке виникає при обертанні гвинта, часто перевищує тепло, необхідне матеріалу, що призводить до надто високої температури матеріалу в стволі; якщо занадто багато тепла не буде розряджено вчасно, це призведе до розкладання матеріалу (особливо термочутливих пластиків). Для цього ствол і гвинт мають бути охолоджені.

Крім того, співвідношення тепла в цих двох частинах відрізняється в різних ділянках процесу екструзії: у секції подачі через глибоку гвинтову канавку матеріал не ущільнений, тепло тертя дуже мало, більшість тепла надходить від нагрівача. У відділі гомогенізації матеріал розплавлений, температура вища, канавка гвинта неглибока, а тепло, що утворюється від зсуву тертя, більша, і іноді не лише не потребує нагрівання, а й холоднішого охолодження [18]. У секції стиснення нагрівання матеріалу є перехідним станом у двох вищезазначених випадках, тобто тепло, що генерується від фрикційного зсуву, більше, ніж у секції подачі, і менше, ніж у гомогенізуючій секції. Тому система нагрівання та охолодження екструдера здебільшого розкладена на секції. З енергетичної точки зору, процес екструзії має проблему теплової рівноваги. Частина тепла, що подається нагрівачем, і тепла тертя, що виникає при зсуві тертя, використовується для зміни стану пластику, а інша частина втрачається. Хоча існує багато факторів, що впливають на цей баланс, його слід завжди підтримувати за умов стабільної екструзії.

Щоб привести екструдер до робочої температури, необхідне нагрівання, що доводить екструдер до належної температури для запуску та для підтримання бажаної температури під час нормальної роботи. Існує три методи нагрівання екструдера: електричне нагрівання, нагрівання рідиною та нагрівання парою. Електричне нагрівання є найпоширенішим методом нагрівання екструдерів [18-21]. Електричне нагрівання переважає над паровим та рідинним опаленням у екструдері, оскільки може охоплювати набагато ширший температурний діапазон, є дешевшим та легким у обслуговуванні порівняно з паровими та рідинними нагрівачами. Вони розташовані на стінках циліндра екструдера у відповідних зонах. Маленькі екструдери зазвичай мають

					ННІЕТ КНУ.133.ГМБ-22.2026.ПЗ	Арк.
						31
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

менше нагрівачів та зон, тоді як великі екструдери мають більше нагрівачів і зон. Кожна зона контролюється автономно, щоб можна було підтримувати температурний профіль уздовж екструдера. Це може бути рівномірний температурний профіль, профіль з підвищенням або зниженням температури, або комбінація обох залежно від конкретного полімеру та умов роботи.

Нагрів екструдера зазвичай зменшує загальне енергоспоживання двигуна, а також загальні енергетичні потреби процесу. Хоча охолодження необхідне, воно не споживає енергію, тому не сприяє загальній потребі процесу в енергії, і енергія, видобута під час охолодження, витрачається даремно. Якщо процес екструзії потребує значного охолодження, це зазвичай є сигналом неправильного проектування процесу, що може означати неправильне проектування гвинта, занадто велику довжину до співвідношення діаметрів або неправильний вибір екструдера [18]. Процес екструзії зазвичай проектується так, щоб більшість енергії надходила від приводу екструдера. Обертання шнека спричиняє тертя та в'язке нагрівання полімеру, що є перетворенням механічної енергії приводу на теплову енергію для підвищення температури полімеру. Механічна енергія, як правило, забезпечує 70–80% від загальної енергії. Це означає, що нагрівачі циліндра забезпечують лише 20–30%, не враховуючи втрат. Якщо більшість енергії надходить від шнека, є велика ймовірність того, що місцеве внутрішнє генерування тепла в полімері перевищує необхідне для підтримки бажаної температури процесу. Тому зазвичай потрібне якесь охолодження. Багато екструдерів використовують примусове повітряне охолодження за допомогою вентиляторів, встановлених під циліндром екструдера.

З іншого боку, енергетичний внесок від нагрівачів бочки не повинен бути занадто великим. Проблема зовнішнього нагрівання полягає в тому, що воно супроводжується відносно великими температурними градієнтами. У матеріалів з низькою теплопровідністю необхідні великі температурні градієнти для того, щоб матеріал нагрівся зовнішнім нагріванням з прийнятною швидкістю. Оскільки полімери мають низьку теплопровідність, підвищення температури полімеру зовнішнім нагріванням є повільним процесом і супроводжується великими температурними градієнтами. Поєднання високих температур і тривалого часу нагрівання збільшує ймовірність деградації. Нагрівання за рахунок генерації в'язкісного тепла в цьому відношенні є набагато більш сприятливим, оскільки полімер нагрівається відносно рівномірно по всій масі.

Повітряне охолодження є досить м'яким типом охолодження, оскільки швидкість передачі тепла є відносно невеликою, що не підходить, якщо потрібне інтенсивне охолодження. З іншого боку, перевага полягає в тому, що коли увімкнено повітряне охолодження, зміна температури відбувається поступово. При водяному охолодженні відразу після його активації відбудеться швидка та різка зміна температури. З точки зору керування, остання ситуація може бути складнішою для контролю [18-20]. У системах рідинного охолодження вода є найпоширенішим теплоносієм. У більшості випадків вода використовується для охолодження розтрубів ствола із канавками, які часто

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

потребують інтенсивного охолодження для ефективного процесу. Однією з ускладнень водяного охолодження є те, що може відбуватися випаровування, якщо температура води перевищує температуру кипіння. Це є ефективним способом відведення тепла, але спричиняє різке збільшення швидкості охолодження. З точки зору керування, це становить нелінійний ефект, і контролювати температуру екструдера стає складніше, якщо відбуваються такі раптові нелінійні ефекти [20-21]. Водяне охолодження може висувати значно вищі вимоги до системи контролю температури у порівнянні з повітряним охолодженням. Ефективність охолодження повітрям можна підвищити, зволоживши його, однак для цього потрібні охолоджувальні канали з корозійностійкого матеріалу. Прихована теплота пароутворення, що циркулює навколо ствола екструдера, відводиться системою водяного охолодження, яка оточує конденсаційну камеру, розташовану окремо від ствола.

Екструдери з масляним або повітряним охолодженням можуть використовувати безступінчасте керування охолодженням за допомогою пропорційних клапанів і сервомоторів для позиціонування. Системи відносно дорогі, проте вони надійні та потребують мало обслуговування. У разі водяного охолодження потужність охолодження зазвичай контролюється шляхом підживлення соленоїдного клапана [19-21]. Для низьких температур зазвичай використовується постійна частота циклу з системою змінної ширини імпульсу. Ширина імпульсу змінюється пропорційно до необхідної потужності охолодження. При високих температурах, коли вода переходить у пару, можливе більш інтенсивне охолодження. У таких випадках можна використовувати інший спосіб керування охолодженням, відомий як система постійної ширини імпульсу. Коли потрібне охолодження, соленоїд підживлюється імпульсним сигналом заданої довжини. Частота імпульсу змінюється пропорційно до охолодження. Охолодження є витратою енергії і його слід мінімізувати настільки, наскільки це можливо.

Також важливо зазначити, що контактний шар між циліндром і полімером складає лише 50% від загальної площі контакту полімер-метал. Тому при нагріванні та/або охолодженні лише циліндра використовується лише близько 50% від загальної поверхні, доступної для передачі тепла. Отже, поверхня гвинта є дуже важливою поверхнею для теплообміну. Багато екструдерів не використовують охолодження або нагрівання гвинта; вони працюють із так званим «нейтральним» гвинтом [13, 18]. Якщо зовнішні вимоги до нагрівання або охолодження незначні, нагрівання або охолодження гвинта, як правило, не потрібне. Проте, якщо зовнішні вимоги до нагрівання та охолодження суттєві, нагрівання та охолодження гвинта може стати дуже важливим, а іноді й необхідним. Нагрівання або охолодження гвинта трохи складніше, ніж нагрівання або охолодження циліндра, оскільки гвинт знаходиться в русі.

Призначення охолоджувальних гвинтів, по-перше, отримати максимальні швидкості передачі твердих тіл. З теорії твердого транспортування відомо, що швидкість передачі твердого тіла пов'язана з різницею між коефіцієнтом тертя матеріалу до гвинта та коефіцієнтом тертя матеріалу до ствола. Тобто, чим

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

більший коефіцієнт тертя між стволом і матеріалом, тим менший коефіцієнт тертя між матеріалом і гвинтом, тим більш сприятливим для транспортування твердих матеріалів. Окрім відкриття поздовжньої канавки на внутрішній стінці секції подачі ствола для покращення поверхневого покриття гвинта, це також можна досягти, контролюючи температуру ствола та гвинта [13]. Це пов'язано з тим, що фрикційні властивості твердих пластмас сильно залежать від температури за різних умов. У деяких випадках для певної сировини коефіцієнт тертя зростає з підвищенням температури, а в інших – зменшується, тому необхідно контролювати температуру ствола і гвинта в зоні твердого транспортування, контролюючи температуру ствола і гвинта в зоні твердого транспортування, так що різниця між коефіцієнтом тертя ствола і матеріалу та коефіцієнтом тертя гвинта і матеріалу є найбільшим для досягнення максимальної швидкості передачі твердого тіла.

По-друге, гвинт охолоджується для контролю якості виробу. Якщо охолоджувальний отвір гвинта забити до гомогенізації для охолодження, пластифікація матеріалу покращується, і якість продукту може бути покращена. Однак ступінь екструзії зменшиться, а температура охолоджувальної води на виході буде нижчою чим менший об'єм екструзії, що пов'язано з тим, що гвинт секції охолодження для гомогенізації змушує матеріал, близький до поверхні гвинта, приклеюватися і ускладнювати протікання, що еквівалентно зменшенню глибини канавки гвинта в розділі гомогенізації [18]. Матеріали з високою в'язкістю повинні приділяти особливу увагу тому, щоб температура охолоджувальної води не була надто низькою, інакше може статися випадкове скручування гвинта. З точки зору енергоспоживання, охолоджувальний гвинт втрачає частину тепла.

Під час процесу екструзії енергія, необхідна для обробки, забезпечується мотором та нагрівачами циліндра і зазвичай дуже мала, незначна частина енергії мотора втрачається через привідний ланцюг у вигляді тертя в муфті та коробці передач. Більшість механічної енергії мотора, що витрачається на обертання гвинта, а дуже мала частина механічної енергії використовується для ущільнення сировини, для розвитку тиску розплаву та для переміщення розплаву з гвинта. Тиск розплаву, що розвивається на кінці гвинта падає до атмосферного, коли розплав виходить із формувальної головки, перетворюючи механічну енергію, пов'язану з тиском розплав [13, 18].

Фактично близько 80% механічної енергії двигуна перетворюється на тепло. Тепло, що генерується у розплаві є основним джерелом тепла, яке використовується для плавлення полімерної сировини. Теплова енергія що надається нагрівачами циліндра, передається сировині через циліндр. Коли сировина перегрівається вище встановленого значення нагрівача циліндра, система охолодження на циліндрі відводить тепло від розплаву. Деяка кількість тепла втрачається в навколишнє середовище через циліндр та вал гвинта. Баланс загальної механічної та теплової енергії дорівнює збільшеному тепловому вмісту полімеру від температури сировини до температури розплаву (рис. 2.2).

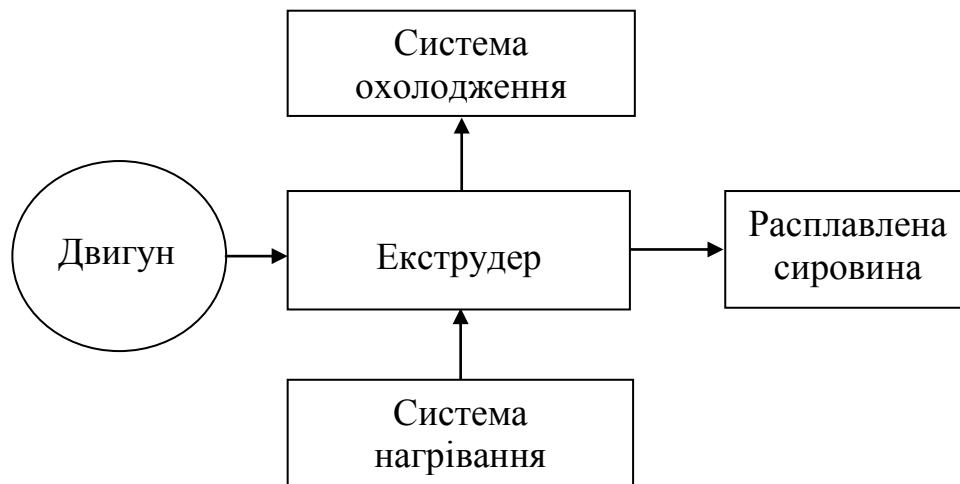


Рисунок 2.2 – Система нагріву та охолодження в екструдері

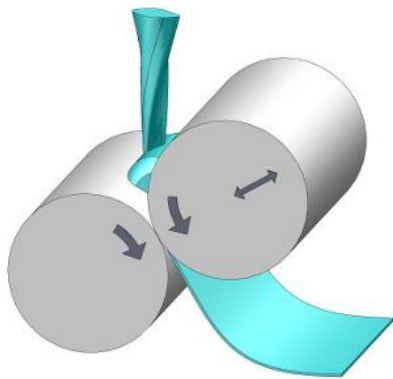
Тому кожна зона обробки (секція нагріву, секція транспортування, секція дозування) потребує окремого набір охолоджувальних та нагрівальних елементів для досягнення точного контролю температури процесу. Доцільно, щоб секція подачі мала постійне охолодження, щоб продукт не розплавився в даній секції, а також щоб температура в циліндрі не передавалася на коробку передач розподільника та раму екструдера. Передача тепла на коробку передач розподільника може призвести до пошкодження ущільнень валів, що спричиняє витік масла, а також підвищує температуру масла всередині коробки передач, знижуючи здатність масла до змащування.

2.4 Удосконалення конструкції блоку охолодження

Після виходу продукту з екструдера він зазвичай проходить кілька процесів, таких як охолодження, сушіння, ароматизація, формування, пакування, фасування тощо. Виробництво багатьох екструзійних продуктів харчування на останній стадії потребує охолодження, перш ніж сировина зможе пройти подальші процеси. Важливим етапом у багатьох виробничих процесах є застосування охолоджувальних роликів. Його призначення – регулювати температуру циліндрів, роликів або барабанів. Роликове охолодження охолоджує ці компоненти водою або повітрям, що підвищує ефективність, запобігає деформації та зменшує в'язкість та липкість сировини (рис. 2.3).

Існує два типи охолоджувального обладнання, що використовуються для охолодження сировини. При повітряному охолодженні використовується вентилятор або нагнітач, щоб нагнати повітря на ролики. Коли простір обмежений і тепло поміrne, цей метод працює ефективно. Системи водяного охолодження ефективно працюють під високими тепловими навантаженнями і можуть витримувати більше тепла. Вони забезпечують охолодження та ефективність, незважаючи на більшу складність.

Наприклад, для екструдованих жувальних гумок, лакриці, ірису та деяких видів м'яких цукерок необхідне швидке охолодження після процесу екструзії.



Швидке охолодження на роликах запобігає прилипанню та дозволяє формувати виріб. Розплавлений екструдований матеріал потрібно сформувати у суцільну стрічку або смужку, що досягається за допомогою двох регульованих охолоджених валків, які обертаються поруч один з одним, де зазор забезпечує продукт бажаної товщини.

Рисунок 2.3 – Роликове охолодження

Перший тип охолодження валкового типу, коли екструдат подається через набір валків, які стискають розплавлену сировину у тонку суцільну стрічку. Охолоджений екструдат потім може проходити через подрібнювачі, які подрібнюють його на дрібні шматочки, наприклад, на пластівці. Основним недоліком охолоджувального обладнання є короткий час контакту розплавленого матеріалу з валками, який не дозволяє сировині досягти бажаної температури твердіння [8, 13]. Другий тип охолоджувального блока складається з набору подібним чином охолоджених роликів, за якими слідує конвеєрна стрічка. Конвеєр, зазвичай металевий, простягається на кілька метрів і охолоджується знизу за допомогою розпилювачів, які розпилюють охолоджену воду на конвеєр. Виходячи з екструдера, екструдат проходить через пару роликів, формуючи його у суцільну тонку стрічку. Потім його укладають на конвеєр, де він охолоджується, перш ніж пройти через подрібнювач наприкінці конвеєрної стрічки. Перевага такого типу охолоджувального блока полягає в тому, що продукт легко досягає бажаної температури.

Продукт контактує з охолоджувальною поверхнею валика. Тепло передається через його поверхню у холодну воду всередині вальця. Оскільки ролик має безперервний оберт, циркуляція води здійснюється за допомогою пристрою, що називається ротаційним з'єднанням з подвійним проходом. Холодна вода входить у нерухому частину муфти в точці, потім тече до точки, яка є обертовою частиною, безпосередньо з'єднаною з роликом [1]. Після того як тепло передається воді, вона знову потрапляє в муфту і виходить з охолодженого ролика для циркуляції через охолоджувальне обладнання. Щоб мати можливість подрібнити продукт після екструзії, розплавлений екструдат потрібно сформувати у безперервну смугу або стрічку, що досягається за допомогою двох регульованих охолоджуваних валків, які обертаються близько один до одного, де проміжок забезпечує продукт бажаної товщини. Продукт охолоджується шляхом теплопровідності через металеву стінку валика за допомогою постійної циркуляції води, яка зовні охолоджується чилером. Низька температура води у валику призводить до того, що він постійно покритий конденсатом, а охолоджені валики виготовляються з нержавіючої сталі або покриті для захисту від корозії, яка може забруднити продукт.

Традиційно продукт прокочується у тонкий лист за допомогою пари охолоджувальних валків і укладається на конвеєрну стрічку, яка охолоджується знизу за допомогою системи розпилення. Потім продукт подається в бункер за необхідності, який подрібнює його на пластівці. Існують два різні пристрої для охолодження продукції, які традиційно використовуються: тип із парними роликами та конвеєрний тип. Пристрій із парними роликами має перевагу компактності, але контактує з продуктом недовго, що призводить до недостатнього охолодження продукції. Конвеєрний пристрій здатний охолоджувати продукцію до потрібної температури. Тому необхідний охолоджувальний пристрій, який використовував би переваги обох типів охолоджуючих пристроїв.

Для різні типи механізмів охолодження мають як переваги, так і недоліки. Мета полягає в тому, щоб удосконалити конструкцію охолоджуючого ролика. Великий валик є головним механізмом теплообміну. У цій концепції конвеєрна стрічка обгортається навколо цього валика за допомогою напрямних роликів. Під час виробництва продукт подається між конвеєром і охолоджуючим валиком, що має забезпечувати хороший контакт між продуктом та охолоджуючим валиком [1]. Обгортання стрічки навколо валика також забезпечує збільшену довжину контакту – іншими словами, покращений час контакту, що забезпечує належне охолодження продукту. Конвеєр використовується для транспортування продукту, де його подрібнюють на пластівці для процесу подрібнення. Гарячий екструдат охолоджується на роликах до крихкого стану, після чого він розбивається на пластівці або подрібнюється в порошок.

Технічні характеристики конструкції охолоджуючого ролика та сировини наведені в таблицях 2.2 та 2.3.

Таблиця 2.2 – Технічні характеристики конструкції охолоджуючого ролика

Бажана товщина пластівця	2 мм
Температура виходу екструдату з екструдеру	130 ⁰ С
Бажана температура екструзійного матеріалу після охолодженого валика	40 ⁰ С
Температура подачі холодної води	3-5 ⁰ С

Таблиця 2.3 – Властивості екструдату

Теплопровідність екструдату	4 Вт/м К
Питома теплоємність екструдату за постійного тиску	2500 Дж/кг К
Щільність екструдату	430 кг/м ³

Для ітераційного процесу обчислення початкова ширина плівки на валку була обрана як 280 мм. Тангенціальна швидкість становить

$$w_F = 0.280m \quad t_F = 0.002m$$

Площа поперечного перерізу становить [1]

$$A_F = w_F \times t_F = 0.28 \times 0.002 \\ = 0.00056 m^2$$

Кутова швидкість

$$v_t = \frac{\dot{V}}{A_F} = \frac{4.5 \times 10^{-5}}{0.00056} = 0.08 m/s$$

Діаметр валика обчислюється за часткою кола валика, що контактує з продуктом [1]

$$D_R = \frac{0.32}{(0.47 \times \pi)}$$

$$D_R = 0.217 m = 217 mm$$

Обертова швидкість ролика розраховується за допомогою дотичної швидкості діаметра та ролика

$$v_t = \omega \cdot r$$

де ω – кутова швидкість, об/хв;

r – радіус ролика, м.

Кутова швидкість ролика

$$\omega = v_t / r = \frac{0.08}{0.1085} = 0.737$$

Натяг ремня встановлюється за допомогою регульованого ролика тоді як ремінь обертається навколо великого охолодженого ролика за допомогою менших роликів. Ремінь проходить поверх формувального ролика, що робиться для того, щоб продукт не прилипав до формувального ролика (рис. 2.4).

Запропонована конструкція удосконаленого блоку охолодження, яка забезпечує відведення тепла від продукту через поверхню ролика за допомогою охолодженої води, яка циркулює через охолоджуючий ролик. Обмін води здійснюється з використанням подвійного проходу роторного з'єднувача, а основний охолоджуючий ролик є єдиним роликом, який контактує з продуктом. Конструкція блоку охолодження роликів була вдосконалена, внаслідок чого забезпечує ефективне відведення тепла від продукту завдяки тривалому контакту сировини з охолодженим роликом, завдяки концепції обгорткового ремня, що є ефективним у процесі виробництва жувальних гумок. Швидке охолодження за допомогою блоку охолодження запобігає прилипанню та дозволяє формувати виріб у процесі подальшого подрібнення.

					ННІЕТ КНУ.133.ГМБ-22.2026.ПЗ	Арк.
						38
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

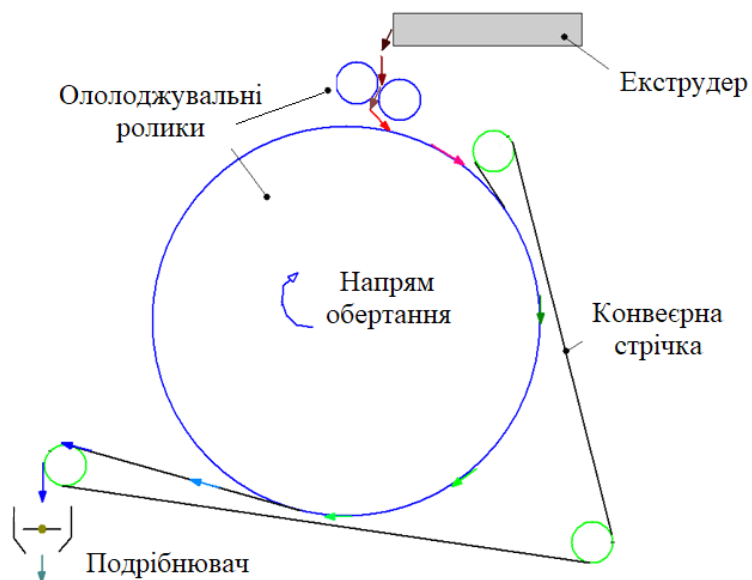


Рисунок 2.4 – Конструкція удосконаленого блоку охолодження

На основі вище зазначеного можна вважати, що контроль основних параметрів процесу екструзії посідає одне з чільних місць. Тому узагальнено вхідні, вихідні та системні змінні, пов'язані з процесом екструзії. Системні змінні: температурний профіль, тиск на матриці, крутний момент, ступінь заповнення. Змінні процесу: температура, швидкість подачі, швидкість шнека, додавання води/пари, швидкість різача. Змінні конструкції екструдера: конфігурація шнека, розмір/ форма матриці, довжина циліндра. Продуктивність екструдера: пропускна здатність, споживана енергія. Цільові змінні: текстура, колір, смак, харчова цінність.

Зазначено, що температура є однією з необхідних умов для процесу екструзії і система нагрівання та охолодження екструдера має бути налаштована так, щоб забезпечити цю необхідну умову. Тому вважається за необхідне, щоб кожна зона обробки (секція нагріву, секція транспортування, секція дозування) потребує окремого набір охолоджувальних та нагрівальних елементів для досягнення точного контролю температури процесу. Доцільно, щоб секція подачі мала постійне охолодження, щоб продукт не розплавився в даній секції, а також щоб температура в циліндрі не передавалася на коробку передач розподільника та раму екструдера. Передача тепла на коробку передач розподільника може призвести до пошкодження ущільнень валів, що спричиняє витік масла, а також підвищує температуру масла всередині коробки передач, знижуючи здатність масла до змащування.

Запропоновано удосконалену конструкцію блоку охолодження, що забезпечує відведення тепла від продукту через поверхню ролика за допомогою охолодженої води, яка циркулює через охолоджуючий ролик. Обмін води здійснюється з використанням роторного з'єднувача, а основний охолоджуючий ролик є єдиним роликом, який контактує з продуктом. Конструкція блоку охолодження роликів була вдосконалена, внаслідок чого забезпечує ефективне відведення тепла від продукту завдяки тривалому контакту сировини з охолодженим роликом, завдяки концепції обгорткового ремня.

РОЗДІЛ 3 АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕНЬ

3.1 Контроль температури в екструдері

Температура є однією з необхідних умов для процесу екструзії і система нагрівання та охолодження екструдера налаштована так, щоб забезпечити цю необхідну умову. Існує два джерела тепла для сировини під час екструзії. Одна – це тепло, що подається зовнішнім нагрівачем ствола, а інша – тепло тертя, що виникає внаслідок відносного руху між пластиком і внутрішньою стінкою ствола, пластиком і гвинтом, а також сировиною [22]. Екструдер має систему контролю температури для кожної секції ствола екструдера, де він автоматично контролює та коригує температуру за допомогою подачі пари та води для підтримання стабільної робочої температури. Профіль зон (секцій) температур наведено на рисунку 3.1, значення температури кожної секції наведено в таблиці 3.1.

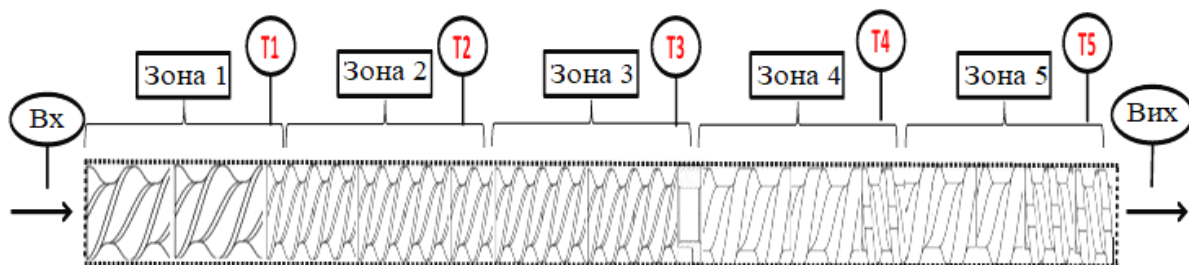


Рисунок 3.1 – Профіль зон температур на стволі екструдера

Таблиця 3.1 – Значення температури секції гвинта

Зона	Встановлена температура
Зона 1	19 ⁰ С
Зона 2	60 ⁰ С
Зона 3	130 ⁰ С
Зона 4	126 ⁰ С
Зона 5	132 ⁰ С

Модульний шнек екструдера складається з набору елементів шнека, що включають: шнеки подачі, змішувальні елементи та елементи стиснення. Кожен елемент має свою функцію і в різних комбінаціях та послідовностях він дозволяє всьому гвинту виконувати своє обробне завдання. Шнеки подачі або транспортувальний шнек зазвичай має великий крок і довжину, а його довжина становить кілька діаметрів шнека. Характерною особливістю шнеків з великим кроком є швидка транспортувальна дія і низький тиск на продукт. Ці елементи

					ННІЕТ КНУ.133.ГМБ-22.2026.ПЗ						
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	Удосконалення шнекового екструдера з інтегрованою системою охолоджувальних роликів	Літ.		Арк.		Аркуші	
Розроб.	Єрмілко								40	4	
Перевір.	Омельченко										
Н. Контр.	Омельченко										
Затверд.	Цвіркун					ННІЕТ КНУ Кафедра ЗІДО					

зазвичай використовуються в зоні подачі циліндра, де вони транспортують продукт у циліндр до першої стадії обробки. В залежності від потреб продукту, шнек з великим кроком може застосовуватися пізніше в процесі, коли необхідне зниження тиску.

Замішувальні елементи використовуються для змішування сировини. Зазвичай ці елементи складаються з кількох замішувальних дисків, які мають елементи з широкими дисками забезпечують великий рівень зсуву продукту, тоді як елементи з тоншими дисками сприяють змішувальним властивостям замішувальних елементів [1]. Елементи передають більшість механічної енергії від обертання гвинта до продукту через механічний зсув. Елементи стискання – це елементи з кроком, коротшим за їхню довжину. Характеристика такого елемента полягає в тому, що він зменшує швидкість потоку і збільшує тиск на продукт та використовуються для того, щоб уповільнити продукт, забезпечуючи кращу заповнюваність ствола в обробних зонах, що, у свою чергу, підвищує ефективність конкретної ділянки.

Запропонована конфігурація модульного шнека екструдера складається з набору елементів шнека, що включають: шнеки подачі, змішувальні елементи та елементи стиснення. Біля гвинта утворюється розплавлена сировина з низькою швидкістю, яка поступово зростає до досягнення радіальної допустимої величини між гвинтом і поверхнею циліндра. Сировина злегка підхоплюється краєм гвинта, який її транспортує віддаляючи її від осі гвинта, що сприяє тому, що матеріал переходить до наступної секції гвинта. Там сировина накопичується, розмір заглиблення збільшується і процес повторюється у наступній секції (рис. 3.2).

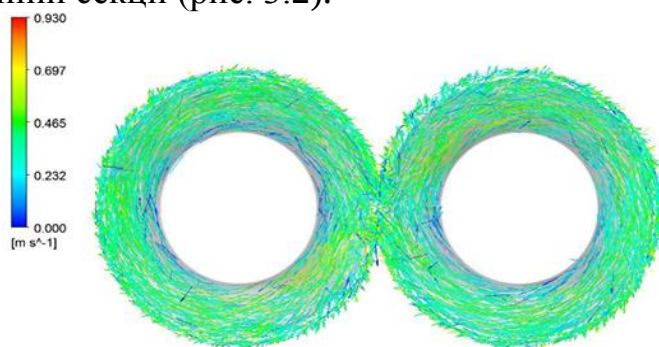


Рисунок 3.2 – Транспортування сировини

Лінії потоку мають змінний профіль швидкості через геометрію гвинтів. Чим більша відстань між осьовими краями секції гвинта, тим довше сировина переходить до наступної секції і тим менша її швидкість. У секціях гвинта з кутами, які мають кут близький до 90° , сировина рухається повільніше, бо там відбувається краще змішування [22, 23]. Сировина накопичується та ущільнюється, що призводить до підвищення тиску. Профіль має низькі швидкості в секціях, де відбувається надходження води або пари.

Основна концепція екструзії полягає в обробці матеріалу через перетворення механічної енергії на теплову енергію, що здійснюється за допомогою одного гвинта, пари гвинтів або двох і більше сегментованих гвинтових валів, які називають багатогвинтовими екструдерами. Обертання

гвинта транспортує сировину, забезпечує найбільшу кількість теплової енергії для продукту та викликає гомогенізацію, змішування і диспергування матеріалу. Геометрія тісно взаємодіючих подвійних гвинтових екструдерів характеризується тим, що обидва сусідні профілі гвинтів мають однакову геометрію є симетричними та обертаються з однаковою швидкістю. Контури швидкості вздовж різних секцій гвинта показано на рисунку 3.3.

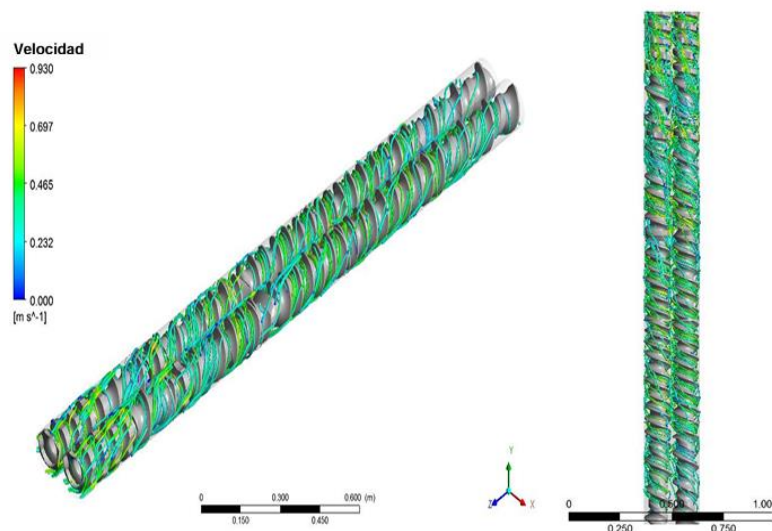


Рисунок 3.3 – Контури швидкості вздовж різних секцій гвинта

Оскільки ствол екструдера оснащений системою нагрівання, необхідно детально перевірити теплову поведінку з точки зору явища теплопередачі. З метою оцінки цієї надзвичайно важливої для роботи поведінки доцільно візуалізувати температуру вздовж стінок внутрішніх гвинтів [22, 23]. Лінії потоку з різних напрямів дозволяють зробити висновок, що локально температури поступово збільшуються про що свідчить отриманий профіль швидкості вздовж ствола екструдера (рис. 3.4).

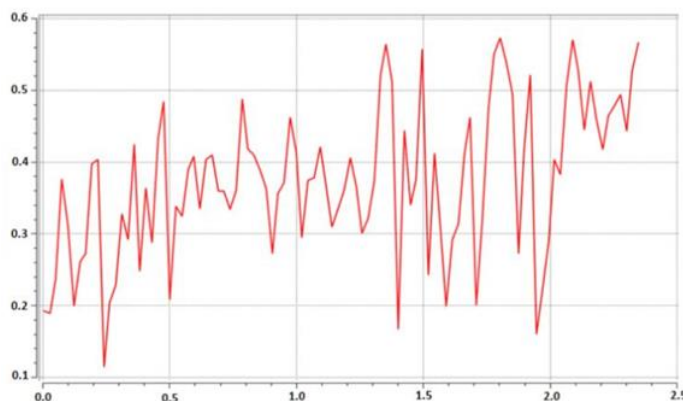


Рисунок 3.4 – Профіль швидкості вздовж обладнання

Розподіл температури вздовж гвинта наведено на рисунку 3.5. Великого значення має контроль температури в процесі, щоб отримати необхідну щільність і твердість продуктів. Підтримання контрольованих температур забезпечує економію енергії, оскільки витрати води, пари та електроенергії

менші. До того ж продукт матиме оптимальні показники якості щодо вологості, жиру та клітковини, що мінімізує відходи та повторну переробку. Також це дозволяє зберегти знос деталей гвинтів і барабанів відповідно до проєктних показників обладнання, що запобігає додатковим витратам на їх заміну.

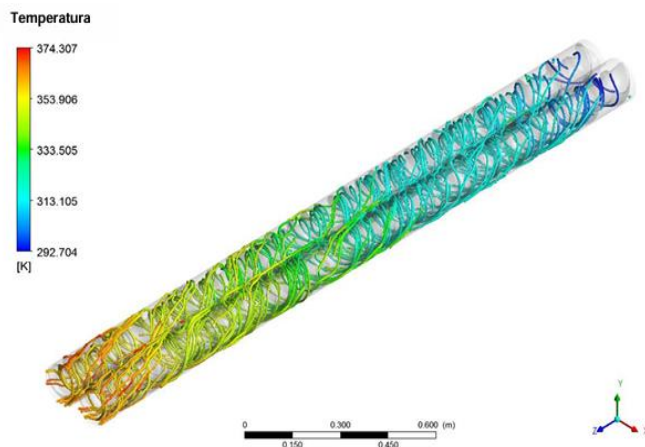


Рисунок 3.5 – Розподіл температури вздовж гвинта

Процес екструзії є одним із найважливіших операцій у процесі переробки продуктів харчування – це пов’язано з тим, що він дозволяє поєднувати процеси змішування, варіння, розширення та подрібнення для отримання продуктів високої якості та з меншими енергетичними витратами [22]. Зміни температури в процесі екструзії зумовлені насамперед внеском теплопередачі від стінок ствола екструдера, в’язкістю рідини та конфігурацією секцій гвинтів екструдера.

На основі вище зазначеного можна вважати, що температура є однією з необхідних умов для процесу екструзії і система нагрівання та охолодження екструдера має бути налаштована так, щоб забезпечити цю необхідну умову. Тому великого значення має контроль температури в процесі екструзії задля отримання необхідної щільності і твердості продуктів. Запропоновано модульний шнек, який складається з набору елементів, що включають: шнеки подачі, змішувальні елементи та елементи стиснення. Кожен елемент має свою функцію і в різних комбінаціях та послідовностях він дозволяє всьому гвинту виконувати своє обробне завдання.

Здійснено моделювання розподілу температури та швидкості вздовж гвинта. В процесі моделювання виявлено, що лінії потоку мають змінний профіль швидкості через геометрію гвинтів. Чим більша відстань між осьовими кінцями секції гвинта, тим довше сировина переходить до наступної секції і тим менша її швидкість. У секціях гвинта з кутами, які мають кут близький до 90° , сировина рухається повільніше, бо там відбувається краще змішування. Сировина накопичується та ущільнюється, що призводить до підвищення тиску. Профіль має низькі швидкості в секціях, де відбувається надходження води або пари. Підтримання контрольованих температур забезпечує економію енергії, оскільки витрати води, пари та електроенергії менші. До того ж продукт матиме оптимальні показники якості щодо вологості, жиру та клітковини, що мінімізує відходи та повторну переробку.

ВИСНОВКИ

Бакалаврська робота присвячена удосконаленню шнекового екструдера з інтегрованою системою охолоджувальних роликів. У роботі зазначено, що глобальний попит на доступні та збалансовані продукти продовжує зростати, що призводить до стрімких інновацій у технологіях переробки харчових продуктів. Серед них приготування методом екструзії стало одним із найбільш трансформаційних способів виробництва готових до вживання продуктів, таких як закуски, сніданкові каші, білкові добавки та дитяче харчування.

У першому розділі здійснено аналіз обладнання для екструзії продуктів харчування. Вважається, що екструзія – це безперервний або напівбезперервний процес формування сировини у однорідну форму шляхом витискання під контрольованими умовами. Екструзійний процес – це термічний метод обробки, що застосовує високу температуру, тиск і зсувну силу на сирі маси, отримуючи широкий спектр харчових продуктів, таких як закуски, готові до вживання пластівці, кондитерські вироби, хрусткий хліб.

Аналіз наукових джерел дав змогу констатувати, що процес екструзії може проводитися гарячим та холодним способом. Гаряча екструзія передбачає нагрівання сировини вище 100°C , використовуючи фрикційне нагрівання для швидкого підвищення температури. При холодній екструзії харчові матеріали нагріваються нижче 100°C , задля підтримки температури для формування та змішування різних продуктів, таких як тісто, м'ясо та паста. Екструдери обираються на основі сировини та бажаної продукції. Екструдери відрізняються за формою, розміром і роботою: поршневі, роликові або гвинтові. Гвинтові екструдери, найскладніші, використовують обертові гвинти у стаціонарному стволі для транспортування матеріалу через штамп і можуть мати один чи декілька гвинтів.

Другий розділ присвячено удосконаленню шнекового екструдера з інтегрованою системою охолоджувальних роликів. Зазначено, що контроль основних параметрів процесу екструзії посідає одне з чільних місць. Тому узагальнено вхідні, вихідні та системні змінні, пов'язані з процесом екструзії:

- системні змінні: температурний профіль, тиск на матриці, крутний момент, ступінь заповнення;
- змінні процесу: температура, швидкість подачі, швидкість шнека, додавання води/пари, швидкість різача;
- змінні конструкції екструдера: конфігурація шнека, розмір/ форма матриці, довжина циліндра;
- продуктивність екструдера: пропускна здатність, споживана енергія;
- цільові змінні: текстура, колір, смак, харчова цінність.

Зазначено, що температура є однією з необхідних умов для процесу екструзії і система нагрівання та охолодження екструдера має бути

					ННІЕТ КНУ.133.ГМБ-22.2026.ПЗ								
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата									
Розроб.		Єрмілко			Удосконалення шнекового екструдера з інтегрованою системою охолоджувальних роликів				Літ.	Арк.	Аркушів		
Перевір.		Омельченко									44	2	
									ННІЕТ КНУ Кафедра ЗІДО				
Н. Контр.		Омельченко											
Затверд.		Цвіркун											

налаштована так, щоб забезпечити цю необхідну умову. Тому вважається за необхідне, щоб кожна зона обробки (секція нагріву, секція транспортування, секція дозування) потребує окремого набір охолоджувальних та нагрівальних елементів для досягнення точного контролю температури процесу. Доцільно, щоб секція подачі мала постійне охолодження, щоб продукт не розплавився в даній секції, а також щоб температура в циліндрі не передавалася на коробку передач розподільника та раму екструдера. Передача тепла на коробку передач розподільника може призвести до пошкодження ущільнень валів, що спричиняє витік масла, а також підвищує температуру масла всередині коробки передач, знижуючи здатність масла до змащування.

Запропоновано удосконалити конструкцію блоку охолодження, що забезпечує відведення тепла від продукту через поверхню ролика за допомогою охолодженої води, яка циркулює через охолоджуючий ролик. Обмін води здійснюється з використанням роторного з'єднувача, а основний охолоджуючий ролик є єдиним роликом, який контактує з продуктом. Конструкція блоку охолодження роликів була вдосконалена, внаслідок чого забезпечує ефективне відведення тепла від продукту завдяки тривалому контакту сировини з охолодженим роликом, завдяки концепції обгорткового ремня. Натяг ремня встановлюється за допомогою регульованого ролика тоді як ремінь обертається навколо великого охолодженого ролика за допомогою менших роликів. Ремінь проходить поверх формувального ролика, що робиться для того, щоб продукт не прилипав до формувального ролика. Конструкція є доцільною для таких продуктів, наприклад, наприклад, екструдовані жувальні гумки, лакриця, ірис та деякі види м'яких цукерок. Швидке охолодження на роликах запобігатиме прилипанню та дозволить сформувати виріб.

Третій розділ присвячено моделюванню контролю температури в екструдері. Температура є однією з необхідних умов для процесу екструзії і система нагрівання та охолодження екструдера має бути налаштована так, щоб забезпечити цю необхідну умову. Оптимізовано модульний шнек, який складається з набору елементів, що включають: шнеки подачі, змішувальні елементи та елементи стиснення. Кожен елемент має свою функцію і в різних комбінаціях та послідовностях він дозволяє всьому гвинту виконувати своє обробне завдання.

Здійснено моделювання розподіл температури та швидкості вздовж гвинта. В процесі моделювання виявлено, що лінії потоку мають змінний профіль швидкості через геометрію гвинтів. Чим більша відстань між осьовими кінцями секції гвинта, тим довше сировина переходить до наступної секції і тим менша її швидкість. У секціях гвинта з кутами, які мають кут близький до 90°, сировина рухається повільніше, бо там відбувається краще змішування. Сировина накопичується та ущільнюється, що призводить до підвищення тиску. Профіль має низькі швидкості в секціях, де відбувається надходження води або пари. Підтримання контрольованих температур забезпечує економію енергії, оскільки витрати води, пари та електроенергії менші. До того ж продукт матиме оптимальні показники якості щодо вологості, жиру та клітковини, що мінімізує відходи та повторну переробку.

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

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Development of a twin screw extruder with an integrated cooling roller system. URL: <https://repository.nwu.ac.za/items/58d12a06-65ff-49ae-8a47-c4d77c86d435/full>.
2. Production of caseins using extrusion technology. URL: <https://escholarship.mcgill.ca/concern/theses/4j03d043h>.
3. Різниця між холодним екструзією і гарячим екструзією. Режим доступу: <https://ua.kx-aluminum.com/info/the-difference-between-cold-and-hot-extrusion-36227817.html>.
4. Переваги та недоліки холодної екструзії. Режим доступу: <https://ua.lksteelpipe.com/info/advantages-and-disadvantages-of-cold-extrusion-17295848271406080.html>.
5. Екструзія: виробничий процес для створення різних форм і виробів. Режим доступу: <https://www.richconn-cnc.com/uk/what-is-extrusion.html>.
6. Exporters' information requirements: the role of competitive intelligence in the export promotion of extruders. URL: <https://repository.nwu.ac.za/items/e0f89d38-c77a-4657-b2b6-19448109eddf>.
7. Applications of food extrusion technology. URL: <https://medcraveonline.com/MOJFPT/applications-of-food-extrusion-technology.html>.
8. Enfriamiento por rodillos: principios, beneficios y aplicaciones. URL: <https://www.richconn-cnc.com/es/roll-cooling-principles-benefitsapplication.html>.
9. Типи екструдерів за кількістю та типом шнеків. Режим доступу: <https://ten24.com.ua/ua/blog/tipy-ekstrudero-v-po-kolichestvu-i-tipu-shnekov/>.
10. Розуміння харчової екструзії: процес екструзії в харчовій промисловості. Режим доступу: <https://loyalmachines.com/uk/blog/the-manufacturing-process-of-extruded-food-products/>.
11. Застосування екструзії для удосконалення процесів виробництва шнеків. Режим доступу: <https://dspace.nuft.edu.ua/server/api/core/bitstreams/>.
12. Thermal and mechanical design of twin screw extruders for food processing a review. URL: <https://www.ijfans.org/uploads/paper/1239528a86cf8.pdf>.
13. Temperature control of the extruder, what are the differences between water cooling and air cooling? URL: <https://www.cowinextrusion.com/temperature-control-of-the-extruder-what-are-the-differences-between-water-cooling-and-air-cooling/>.
14. Що таке залежні, незалежні та контрольовані змінні? Режим доступу: <https://uk.lamsience.com/what-are-dependent-independent-controlled-variables>.
15. Основи проектування одночерв'ячних екструдерів / І.О. Мікульонок, О.Л. Сокольський, В.І. Сівецький, Л.Б. Радченко. К.: НТУУ «КПІ», 2015. 200 с.
16. Diseño de una extrusora para plásticos. URL: <https://files01.core.ac.uk/download/pdf/71395481.pdf>.
17. Diseño y simulación de una máquina extrusora para la reutilización de material pet en forma de filamento para impresoras 3D. URL: <https://files01.core.ac.uk/download/591788459.pdf>

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

18. Energy analysis in the extrusion of plastics. URL: https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/53774/NANA_LEVI.pdf?sequence.

19. Повітряне або водяне охолодження для нагрівачів екструдера. Режим доступу: <https://ten24.com.ua/ua/blog/vozdushnoe-ili-vodyanoe-okhlazhdenie-dlya-nagrevateley-tsilindra-ekstrudera-chto-luchshe/>.

20. Спосіб нагрівання та охолодження екструдера. Режим доступу: <https://ua.jingfeichina.com/news/heating-and-cooling-method-of-extruder-47014932.html>.

21. Розробка системи охолодження корпусу шнекового екструдера 3D-принтера. Режим доступу: <https://technologies-engineering.com.ua/uk/journals/t-24-6-2023/rozrobka-sistemi-okholodzhennya-korpusu-shnekovogo-ekstrudera-3d-printera>

22. Evaluación del proceso de extrusión de doble tornillo a partir del modelamiento y simulación en dinámica de fluidos computacionales (CFD) para la obtención de alimentos. URL: <https://bffrepositorio.unal.edu.co/server/api/core/bitst>.

23. Модернізація системи стабілізації температури матеріалу в циліндрах екструдера. Режим доступу: <https://dspace.kntu.kr.ua/items/60a7a671-36ae-44c3-8da6-b55cbc15c139/full>.

24. Мирончук В.Г. Обладнання підприємств переробної та харчової промисловості. Вінниця: Нова книга, 2010. 720 с.

25. Мирончук В.Г. Розрахунки обладнання підприємств переробної і харчової промисловості. Вінниця: Нова книга, 2004. 288 с.

26. Антипов С.Т. Машины та аппараты пищевых производств К.: Харчова промисловість, 2001. 680 с.

					ННІЕТ КНУ.133.ГМБ-22.2026.ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		47