

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Донецький національний університет економіки і торгівлі
імені Михайла Туган-Барановського
Навчально-науковий інститут ресторанно-готельного бізнесу та туризму
Кафедра загальноінженерних дисциплін та обладнання

ДОПУСКАЮ ДО ЗАХИСТУ
Гарант освітньої програми
«Обладнання переробної і харчової
промисловості»
Хорольський В.П.
« ____ » _____ 2024 року

**ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА
ДО КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ**
на здобуття ступеня вищої освіти «Магістр»
зі спеціальності 133 «Галузеве машинобудування»
за освітньою програмою «Обладнання переробної і харчової промисловості»
на тему: **«ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ЕКСТРУЗІЇ ТА УДОСКОНАЛЕННЯ
ШНЕКОВОГО ЕКСТРУДЕРА»**

Виконав:
здобувач вищої освіти Бельговський Максим Олександрович
(прізвище, ім'я, по-батькові) (підпис)

Керівник: доцент, к.п.н., Цвіркун Л.О.
(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали) (підпис)

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

Здобувач вищої освіти _____
(підпис)

Кривий Ріг
2024

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

ДОНЕЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ЕКОНОМІКИ І ТОРГІВЛІ
ІМЕНІ МИХАЙЛА ТУГАН-БАРАНОВСЬКОГО

Навчально-науковий інститут ресторанно-готельного бізнесу та туризму
Кафедра загальноінженерних дисциплін та обладнання

Форма здобуття вищої освіти денна

Ступінь магістр

Галузь знань Механічна інженерія

Освітня програма Обладнання переробної і харчової промисловості

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Гарант освітньої програми «Обладнання
переробної і харчової промисловості»
Хорольський В.П.

« » 2024 року

ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ ЗДОБУВАЧУ ВИЩОЇ ОСВІТИ

Бельговському Максиму Олександровичу

(прізвище, ім'я, по-батькові)

1. Тема кваліфікаційної роботи: «Дослідження процесу екструзії та удосконалення шнекового екструдера»

Керівник роботи к.п.н., Цвіркун Л.О.

(науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали)

Затверджено: наказом першого проректора ДонНУЕТ імені Михайла Туган-Барановського від « 08 » травня 2024 р. № 59-с.

2. Строк подання здобувачем ВО роботи « 06 » грудня 2024 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. Аналітичний огляд обладнання для екструзії харчових продуктів.

3. Удосконалення обладнання для здійснення процесу екструзії.

4. Аналіз результатів досліджень.

5. Висновки.

6. Список використаних джерел.

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

Обладнання для екструзії харчових продуктів.

Удосконалення одношнекового екструдера.

Моделювання екструзійного навантаження на шнек.

6. Дата видачі завдання «1» вересня 2024 р.

7. Календарний план

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи
1	Вступ	4.09-20.09.2024 р.
2	Аналітичний огляд обладнання для екструзії харчових продуктів	21.09-18.10.2024 р.
3	Удосконалення обладнання для здійснення процесу екструзії	19.10-08.11.2024 р.
4	Аналіз результатів досліджень	09.11-15.11.2024 р.
5	Висновки по роботі	16.11-22.11.2024 р.
6	Оформлення роботи і подання до захисту	23.11-26.11.2024 р.

Здобувач вищої освіти

(підпис)

Бельговський М.О.

(прізвище та ініціали)

Керівник роботи

(підпис)

Цвіркун Л.О.

(прізвище та ініціали)

РЕФЕРАТ

Обсяг і структура магістерської роботи. Повний обсяг магістерської роботи – 50 сторінок, в тому числі основного тексту – 45 сторінок. Робота містить: 2 таблиці, 13 рисунків. Список використаних джерел складається з 22 найменувань.

Об'єкт роботи – шнековий екструдер.

Предмет роботи – процес екструзії в харчовій промисловості.

Мета роботи – дослідження процесу екструзії та удосконалення шнекового екструдера.

У роботі зазначено, що екструзія – це виробничий процес, який використовується для надання сировині потрібної форми. Екструзія – це термічна обробка, яка передбачає застосування високої температури, високого тиску та зсувних сил до в'язкої харчової сировини.

На основі аналізу, було зазначено, що гаряча екструзія та холодна екструзія – це два методи, які використовуються для надання форми сировині. Холодна екструзія має тенденцію отримувати міцніші та стабільніші компоненти, ніж гаряча екструзія, через обмежену швидкість деформації. При холодній екструзії втрати поживних речовин менші завдяки меншій температурі.

Доцільно для досягнення необхідної глибини фізико-хімічних перетворень, внаслідок термомеханічної обробки та отримання більшої кількості різновидів сировини, здійснювати екструзію за рахунок інтенсифікації впливу стискаючих зусиль у зазорі між диском та матрицею. Пропонується використання збірних шнеків різної конфігурації: стандартний шнек екструдера з постійним кроком нарізки витків та шнек зі змінним кроком нарізки заснований на зменшенні кроку нарізки витка шнека. Таким чином, вибираючи конфігурацію шнека, регулюється глибина термомеханічної обробки для виробництва сировини високої якості, виходячи із виду сировини рослинного походження або їх співвідношення в рецептурної суміші.

Запропоновано для зменшення кількості виробничого обладнання об'єднати складові елементи екструдера в один формуючий вузол, що забезпечить легкість обслуговування за рахунок спрощеної конструкції, стабільність та надійність роботи екструдера. Формуючий вузол складається з диска, закріпленого на кінці валу, матриці, яка закріплена на корпусі та відповідної конфігурації шнека. Формуючий вузол сприятиме досягненню однорідності температури в'язкої харчової сировини.

Змодельовано екструзійне навантаження на стандартний шнек екструдера з постійним кроком нарізки витків при 185° та екструзійне навантаження на шнек екструдера з кроком нарізки витків, що зменшуються при 185° із використанням програмного забезпечення. Екструзійне навантаження показує співвідношення між довжиною гвинта з відповідним зміщенням, що відбувається на кожному гвинті. Результати свідчать, що гвинт з кроком нарізки витків, що зменшується має більшу тенденцію до збільшення екструзійного навантаження у порівнянні з традиційним гвинтом.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: шнек, екструдер, екструзія, тиск, температура, нагрів та охолодження у процесі екструзії, моделювання, екструзійне навантаження.

					ДонНУЕТ.133.ГМБ-23м.2024.ПЗ	Арк.
						4
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ЗМІСТ

ВСТУП	6
РОЗДІЛ 1. АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ ЕКСТРУЗІЇ ХАРЧОВИХ ПРОДУКТІВ	7
1.1 Екструзія в харчовій промисловості	7
1.2 Екструзійна обробка продуктів із зернових культур	11
1.3 Обладнання для холодної та гарячої екструзії	13
РОЗДІЛ 2. УДОСКОНАЛЕННЯ ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ ЗДІЙСНЕННЯ ПРОЦЕСУ ЕКСТРУЗІЇ	21
2.1 Параметри екструзії та змінні процесу	21
2.2 Конструкційні особливості шнека екструдера	25
2.3 Удосконалення одношнекового екструдера	29
РОЗДІЛ 3. АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕНЬ	37
3.1 Контроль тиску, температури, нагріву та охолодження у процесі екструзії	37
3.2 Моделювання екструзійного навантаження на шнек	38
ВИСНОВКИ	43
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	45
ДОДАТКИ	46

					ДонНУЕТ.133.ГМБ-23м.2024.ПЗ			
<i>Зм.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>				
<i>Розроб.</i>		<i>Бельговський</i>			Дослідження процесу екструзії та удосконалення шнекового екструдера	<i>Літ.</i>	<i>Арк.</i>	<i>Аркушів</i>
<i>Перевір.</i>		<i>Цвіркун</i>					5	1
<i>Н. Контр.</i>		<i>Омельченко</i>			ДонНУЕТ Кафедра ЗІДО			
<i>Затверд.</i>		<i>Хорольський</i>						

ВСТУП

Актуальність роботи. У роботі зазначено, що екструзія – це виробничий процес, який використовується для надання сировині потрібної форми. Екструзія – це термічна обробка, яка передбачає застосування високої температури, високого тиску та зсувних сил до в'язкої харчової сировини та розглядається як система при якій змішані інгредієнти проходять через отвори матриці для формування та надання відповідної форми сировині.

Мета та задачі дослідження. Метою магістерської роботи є дослідження процесу екструзії та удосконалення шнекового екструдера.

Практична та наукова новизна. На основі аналізу, було зазначено, що гаряча екструзія та холодна екструзія – це два методи, які використовуються для надання форми сировині. Холодна екструзія має тенденцію отримувати міцніші та стабільніші компоненти, ніж гаряча екструзія, через обмежену швидкість деформації. Холодна екструзія краща, оскільки втрати поживних речовин менші завдяки меншій температурі.

Доцільно для досягнення необхідної глибини фізико-хімічних перетворень, внаслідок термомеханічної обробки та отримання більшої кількості різновидів сировини, здійснювати екструзію за рахунок інтенсифікації впливу стискаючих зусиль у зазорі між диском та матрицею. Пропонується використання збірних шнеків різної конфігурації: стандартний шнек екструдера з постійним кроком нарізки витків та шнек зі змінним кроком нарізки заснований на зменшенні кроку нарізки витка шнека. Таким чином, вибираючи конфігурацію шнека, регулюється глибина термомеханічної обробки для виробництва сировини високої якості, виходячи із виду сировини рослинного походження або їх співвідношення в рецептурної суміші.

Запропоновано для зменшення кількості виробничого обладнання об'єднати складові елементи екструдера в один формуючий вузол, що забезпечить легкість обслуговування за рахунок спрощеної конструкції, стабільність та надійність роботи екструдера. Формуючий вузол складається з диска, закріпленого на кінці валу, матриці, яка закріплена на корпусі та відповідної конфігурації шнека. Формуючий вузол сприятиме досягненню однорідності температури в'язкої харчової сировини.

Змодельовано екструзійне навантаження на стандартний шнек екструдера з постійним кроком нарізки витків при 185° та екструзійне навантаження на шнек екструдера з кроком нарізки витків, що зменшуються при 185° із використанням програмного забезпечення. Екструзійне навантаження показує співвідношення між довжиною гвинта з відповідним зміщенням, що відбувається на кожному гвинті. Результати свідчать, що гвинт з кроком нарізки витків, що зменшуються має більшу тенденцію до збільшення екструзійного навантаження у порівнянні з традиційним гвинтом.

					ДонНУЕТ.133.ГМБ-23м.2024.ПЗ			
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата				
Розроб.		Бельговський			Дослідження процесу екструзії та удосконалення шнекового екструдера	Літ.	Арк.	Аркушів
Перевір.		Цвіркун					6	1
Н. Контр.		Омельченко				ДонНУЕТ Кафедра ЗІДО		
Затверд.		Хорольський						

РОЗДІЛ 1

АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ ЕКСТРУЗІЇ ХАРЧОВИХ ПРОДУКТІВ

1.1 Екструзія в харчовій промисловості

Екструзія – це виробничий процес, який використовується для надання сировині потрібної форми. Екструзія визначається як система виштовхування змішаних інгредієнтів через невеликий отвір, званий матрицею, для формування та надання форми сировині. У харчовій екструзії беруть участь як фізичні, так і хімічні процеси. Технологія екструзії в основному використовується в сучасній харчовій промисловості завдяки якості продукції, багатофункціональності, універсальності, низькій вартості, високій продуктивності енергії та екологічності. При екструзійному варінні крохмалистий, зволожений і білковий харчовий матеріал обробляється за допомогою застосування механічного зсуву, тепла і тиску. Цей процес здійснюється за допомогою стовбура і шнекового механізму.

Основний вплив виявляється на харчові якості поряд з фізико-хімічними властивостями. Так само характер білка, крохмалю та інших складових будуть змінюватися через зміну хімічної структури. Екструзійна кулінарія – це метод розроблений для виробництва інноваційних готових до вживання продуктів з доданою вартістю, таких як вироблені зі злаків, до складу яких входять дитяче харчування, сухі сніданки, харчові волокна, корми для домашніх тварин, модифікований крохмаль на основі злаків та традиційні продукти [1-4]. Процес екструзії здійснюється за двома параметрами, а саме під високою температурою і тиском, це простий неварильний спосіб формування сировини. Завдяки використанню численних сировинних інгредієнтів екструзійна кулінарія дозволяє отримати велику різноманітність харчових продуктів. Технологія екструзії харчових продуктів набуває все більшого значення в харчовій промисловості як ефективний виробничий процес.

Завдяки використанню різних видів основних і сирих інгредієнтів технологія екструзійного приготування дозволяє отримати кількість харчових продуктів для споживання людиною для свого раціону з різними текстурами, формами, смаками і кольорами. Процес екструзії допомагає у виробництві снєків, продуктів харчування, кормів для домашніх тварин, а також у перенесенні та розміщенні зріджених форм і видів тіста з підготовленого основного матеріалу. Екструзійна кулінарія – це процес, який призводить до інактивації сирих ферментів, зниження рівня мікроорганізмів у готовому продукті, деактивації природних токсичних речовин, денатурації білка, модифікації ліпідів і клейстеризації крохмалю. Екструдовані харчові продукти мають більш низьку активність води (0,1-0,4) і за рахунок більш низької водної

ДонНУЕТ.133.ГМБ-23м.2024.ПЗ				
<i>Зм.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>
<i>Розроб.</i>	<i>Бельговський</i>			
<i>Перевір.</i>	<i>Цвіркун</i>			
<i>Н. Контр.</i>	<i>Омельченко</i>			
<i>Затверд.</i>	<i>Хорольський</i>			
Дослідження процесу екструзії та удосконалення шнекового екструдера				
		<i>Літ.</i>	<i>Арк.</i>	<i>Аркушів</i>
			7	14
ДонНУЕТ Кафедра ЗІДО				

активності холодний і гарячий екструдований харчовий продукт зберігаються тривалий час. Параметри якості та переважне сприйняття напівфабрикатів – ці два фактори, які залишають за собою місце екструдованих харчових продуктів в раціоні людини. Екструдовані харчові продукти легко засвоюються, приємні на смак і безпечні для споживання. За класифікацію екструдовані харчові продукти розрізняють на продукти споживання тваринного походження, продукти споживання людиною, невитратні матеріали та біорозкладні.

Екструзія харчових продуктів включає операції змішування, плавлення або зсув через отвір (матрицю), яка спеціально розроблена для формування та розширення сировини. Ключові переваги екструзійного приготування включають здатність отримувати різноманітний асортимент екструдованих продуктів з недорогої сировини за мінімальний час обробки, що забезпечує рівномірне виробництво за допомогою ефективною та безперервної системи. Екструдери для харчових продуктів можуть бути розроблені для одночасного виконання кількох операцій одиниці, включаючи змішування або гомогенізацію, термічне варіння, пастеризацію, дегідратацію, формування та зменшення розміру.

При методі екструзії інгредієнти, що використовуються для приготування продукту, спочатку подрібнюються до консистенції борошна грубого помелу для оптимального розміру частинок, а далі до обробленої сировини додаються кінцеві продукти та інші інгредієнти. Для початку процесу варіння вводиться пара, а оброблена сировина (екструдована) після попередньої обробки пропускається через екструдер. Великий обертовий шнек, який присутній в екструдері, міцно встановлений у бочку, який має матрицю на кінці. Екструдований матеріал проходить з матриці через великий обертовий шнек, присутній в екструдері, змушує екструдований матеріал до матриці. Час, проведений матеріалом усередині екструдера, називається часом перебування. Текстура екструдованих виробів змінює там структуру під впливом тепло- і вологовиділення разом зі зменшенням зусиль.

Зміни текстури відбуваються і вони мають різну кількість. Коефіцієнт зміни розглядається як коефіцієнт розширення. Сировина, яка виходить з екструдера розрізається на певну довжину за допомогою лопатей з рівномірною швидкістю, які обертаються навколо отворів матриці. При збереженні пористості вироби після охолодження і сушіння стають жорсткими. Завдяки створенню тиску (10-20 бар) в екструдері продукт виробляє власне тепло і тертя, а в екструдері відбувається процес приготування. Виходячи з параметрів і вхідних даних в цьому процесі може виникнути клейстеризація крохмалю і денатурація білка.

Методи короткочасного використання високих температур беруть участь у багатьох процесах екструзії харчових продуктів. Вогкість, екструдований склад, швидкість леза, швидкість обертання і довжина шнека, температура стовбура і форми матриці є основними параметрами процесу екструзії. Вони контролюються, щоб гарантувати стабільність отриманої сировини. З цих факторів процесу екструзії волога є основним параметром, яка діє на пластифікацію екстрагованої сировини і впливає на в'язкість при змішуванні. Температура, крутний момент і в'язкість продукту зменшуються при

									Арк.
									8
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	ДонНУЕТ.133.ГМБ-23м.2024.ПЗ				

збільшенні вологості і насипної щільності. За рахунок цього тиск у матриці також знижується. Харчова промисловість за допомогою багатьох процесів екструзії вимагає контролю рівня вологості від низького до середнього рівня вологості, тобто нижче 40% вологості. Процес в якому проводиться екструзія високої вологості, називається мокрою екструзією, після упродовження двошнекового екструдера в основному використовується волога екструзія, яка стає все більш ефективною [1-5]. Температура є найважливішим реологічним фактором висококрохмалю, екструдованого при мокрій екструзії. Рівень солі деяких екструдованих продуктів буде визначати текстуру і колір. Концентрація солі в екструдованому продукті відповідає за легкість і коефіцієнт розширення продукту, що пов'язане з виникненням хімічних реакцій. Концентрація солі змінює колір екструдованого продукту, що пов'язано з тим, що активність води в екструдованому продукті змінюється під дією солі і в подальшому змінюється швидкість реакції потемніння.

Другорядні інгредієнти, включаючи ароматизатори та харчові барвники, розподіляються за допомогою солі. Після екструзії вони тим більш рівномірно циркулюють по поверхні виробу після змішування з сіллю. У 1870 році для виробництва ковбаси був розроблений перший екструдер. З 1930 року методом екструзії були розроблені сухі сніданки та упаковані сухі макарони, а з 1950 року для виробництва кормів для домашніх тварин використовується метод екструзії.

Існує два типи процесу екструзії – гаряча та холодна. Обидва мають свої переваги та недоліки, тому важливо розуміти відмінності між ними, перш ніж вирішити, який з них підходить для відповідної сировини. За допомогою процесу гарячої екструзії виробляються різні види харчових продуктів, в яких вилучають продукти від сої, хрусткі снеки на основі злаків, їжу та кондитерські вироби на основі цукру. Гаряча екструзія також відома як екструзійне варіння. Холодна екструзія – просте механічне продавлювання матеріалу з невеликою швидкістю з отриманням необхідних форм на виході, включаючи макарони, бісквітне тісто. Обладнання, яке використовується як для гарячого, так і для холодного методу екструзії, відоме як екструдер.

Гаряча екструзія зазвичай виконується з м'якшою сировиною, через її нижчі температури плавлення. У цьому процесі сировина нагрівається вище температури рекристалізації, а потім продавлюється через матрицю. При цьому створюються форми з підвищеною міцністю і поліпшеною обробкою поверхні в порівнянні з холодною екструзією. Основним недоліком гарячої екструзії є те, що вона може бути дорожчою, ніж холодна екструзія, через додаткову енергію, яка необхідна для нагрівання матеріалу [1-9]. При холодній екструзії сировину не потрібно нагрівати перед продавлюванням через матрицю. Це ідеальний вибір для більш твердих зразків, які вимагають більш високих температур для методів гарячої екструзії. Холодне екструдювання також дозволяє отримати форми з кращими допусками, ніж гаряча екструзія, і меншою кількістю дефектів завдяки меншому термічному навантаженню на сировину під час обробки. Однак, цей метод зазвичай вимагає більших зусиль і має більший знос обладнання, ніж при процесі гарячого екструдювання, через збільшення тертя в матрицях, спричинене нижчими температурами.

					ДонНУЕТ.133.ГМБ-23м.2024.ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		9

Гаряча екструзія та холодна екструзія – це два методи, які використовуються для надання форми сировині. Хоча кінцевою метою є досягнення бажаної форми, відмінності між цими двома процесами можуть бути досить значними. Гаряча екструзія передбачає нагрівання перед потраплянням у матрицю, що дозволяє здійснювати більший контроль над її деформацією [1-9]. Холодна екструзія, з іншого боку, не вимагає попереднього нагрівання, оскільки сировина залишається непорушною у своїй первісній цілісності, перш ніж потрапити в матрицю, де вона піддається екстремальному тиску. Таким чином, холодна екструзія має тенденцію отримувати міцніші та стабільніші компоненти, ніж гаряча екструзія, через обмежену швидкість деформації. Оскільки обидва методи дозволяють виробляти високоякісні вироби, це значною мірою зводиться до характеру виробу, що виробляється, а також до його передбачуваного застосування, щоб визначити, який тип екструзії слід використовувати. Переваги та недоліки гарячої та холодної екструзії наведено в таблиці 1.1.

Таблиця 1.1 – Переваги та недоліки гарячої та холодної екструзії

Гаряча екструзія	Холодна екструзія
Передбачає використання високих температур для проштовхування сировини через матрицю.	Передбачає використання нижчих температур для проштовхування сировини через матрицю.
Використовується для матеріалів, які важко піддаються холодній обробці.	Використовується для матеріалів, які легше піддаються холодній обробці.
Може бути використана для створення форм, які було б неможливо створити за допомогою холодної екструзії.	Може використовуватися для створення форм з більш жорсткими допусками, ніж гаряча екструзія.
Призводить до отримання продукту вищої якості, ніж холодна екструзія.	Призводить до отримання продукту нижчої якості, ніж гаряча екструзія.
Зазвичай дорожча, ніж холодна	Дешевша, ніж гаряча екструзія.

Екструзія набула популярності з наступних причин:

- універсальність: різні види харчових продуктів виробляються шляхом зміни форми матриці, робочого стану екструдера та обробленої сировини;
- зниження витрат: екструзійне приготування знижує витрати на обробку та підвищує рентабельність, ніж формування або методи приготування. Багато традиційних процедур, таких як виробництво кукурудзяних пластівців і хот-догів, стають все більш ефективними і дешевшими, якщо їх витісняють екструзією;
- вища продуктивність та автоматичні операції: екструдери працюють наполегливо та мають високу продуктивність;
- якість продукту: екструзійне приготування їжі вимагає низьких нагрівів для обробки, що запобігає втраті термочутливої суміші.

1.2 Екструзійна обробка продуктів із зернових культур

Технологія екструзії пропонує платформу для обробки різноманітних харчових продуктів, просто змінюючи основну або другорядну сировину та умови переробки. Сировиною для екструдованих харчових продуктів, як правило, є переважно зернове борошно, однак можуть бути включені інші інгредієнти з різних харчових джерел, за умови, що вони відповідають необхідним характеристикам сировини для обладнання. Сировиною для екструзійної переробки є зернові та псевдозлаки, фрукти та овочі, бобові, олійні культури, коріння та бульби, горіхи та насіння, м'ясо. Ця сировина часто використовується в різних комбінаціях, а продукти різної форми, текстури, кольору та зовнішнього вигляду можуть бути отримані шляхом зміни суміші сировини, збірки обладнання та параметрів роботи.

Якість використовуваних інгредієнтів має бути відповідної якості. Також важливі такі властивості сировини, як зчеплення, твердість і поверхневе тертя. Найбільш часто використовуваними інгредієнтами є борошно і гранули з крохмалистих продуктів, таких як кукурудза, рис, пшениця і картопля, хоча використовувалися також інші крохмалисті сировинні матеріали, такі як сорго, маніок, овес, ячмінь, жито і гречка. Структура та текстура основного продукту утворюються шляхом зміни та маніпулювання біополімерами, особливо крохмалем та білками. У продуктах, де білки відіграють основну роль, сировину вибирають з білків олійних культур, таких як соя, або з фракціонованих білків злаків. Матеріали, які включені в рецептуру, мають тенденцію змінювати процес, тим самим модифікуючи отриманий продукт.

Крім сухих сніданків і закусок, інші продукти на основі екструдованих злаків включають макарони, хліб, основи для супів і модифіковані крохмалі, печиво, сухарики і кондитерські вироби. Зерна злаків є поширеними основними продуктами, які забезпечують більше харчової енергії, ніж будь-яка інша група продуктів харчування, оскільки вони є найважливішим джерелом загального споживання їжі з точки зору калорій. Зернові культури мають відносно схожий загальний склад, в яких часто низький і високий вміст білків і вуглеводів відповідно, за винятком вівса і кукурудзи, містять порівняно більшу кількість ліпідів (7-9%), в порівнянні з 1-2% в інших зернових культурах. Завдяки високому вмісту крохмалю злаки є цінними інгредієнтами для численних застосувань екструзії.

Сухі сніданки випускаються двох видів: готові до вживання холодні та гарячі каші (традиційні каші). Щоб скоротити час приготування в домашніх умовах, технології сухих сніданків просунулися від процедур подрібнення зерна для гарячих круп, що вимагають певного варіння, до більш складних методів обробки для виробництва екструдованої продукції, яка відрізняється високою зручністю. Деякі продукти в категорії гарячих круп виготовляються з вівса і пшениці, в той час як рис і кукурудза складають менший відсоток. Крупи зазвичай готують і модифікують шляхом розшарування, підсмажування або екструдування [2-4]. Процес може зажадати видалення висівок і зародків, залишаючи після себе крохмалистий ендосперм. Однак включення висівок або інших джерел харчових волокон може бути необхідним як вимога продукту при

					ДонНУЕТ.133.ГМБ-23м.2024.ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		11

виробництві продуктів з високим вмістом клітковини. Пшеничні висівки, побічний продукт помелу пшениці, використовуються з рослинними білками для виробництва розширених закусок і сухих сніданків з покращеною харчовою та волокнистою цінністю. Зростаючий попит на ці різні готові до вживання крупи можна пояснити їх зручністю, швидким часом приготування та стійкістю при зберіганні. Обробка сухих сніданків представлена на рисунку 1.1.

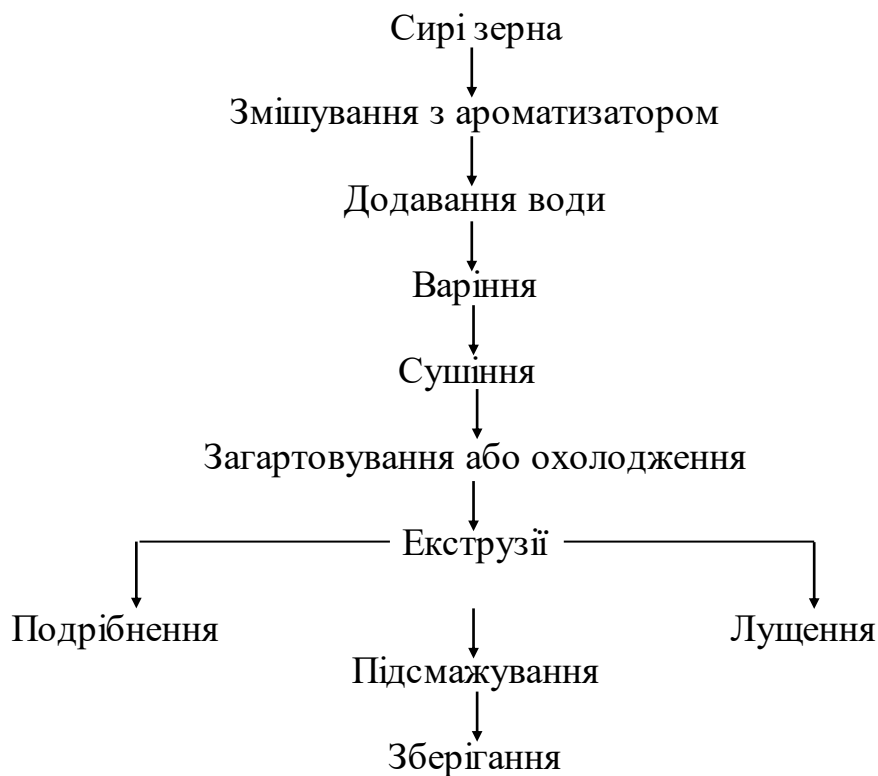


Рисунок 1.1 – Обробка сухих сніданків

Продукти на основі екструдованих злаків можуть бути класифіковані, виходячи з форми продукту, а не типу зерна, на екструдовані пластівці, екструдовані пухкі крупи, екструдовані подрібнені крупи, безпосередньо розширені та мюслі. У рецептурах зернових основним функціональним інгредієнтом є зерно або компонент, отриманий із зерна, і в межах цих категорій екструдовані продукти можуть перероблятися з борошна, цільнозернових або зернових фракцій [2-4]. У порівнянні з традиційними пластівцями, екструдовані пластівці виробляються шляхом екструдування замішаних інгредієнтів через отвір і розрізання тіста на гранули певного розміру. Переробка розширених продуктів порівняна з процесом для пластівців, де основною сировиною є кукурудза, рис, пшеничне борошно або борошно. В якості сировини використовується зернове борошно, а не цільне зерно, для виробництва подрібнених круп.

Варіння або клейстеризація крохмалю залежить від часу, температури, наявності води, а в разі екструзійного варіння від зсуву. Ці фактори синергічно впливають на кінцеву якість екструдованої продукції. Хоча практично всі зернові культури можна обробляти за допомогою екструдера, найбільш підходящими для розширених продуктів є подрібнена кукурудза/крупа та рис.

Крупи, що містять більш високий рівень ліпідів не підходять для розширених продуктів через прослизання тіста в бочці екструдера. Такі злаки вимагатимуть підвищеної вологості та підвищеної температури, щоб відбулося будь-яке значне розширення. Кукурудза відіграє дуже важливу роль на ринку екструдованих злаків, оскільки вона є основним інгредієнтом для численних сухих сніданків і закусок на основі злаків, включаючи цанги та кількість гранульованих продуктів.

Тип перекусу або сухого сніданку, а також тип екструдера визначають грануляцію, яку потрібно використовувати. Дрібна грануляція кукурудзяного борошна дає тонку текстуру та м'якший укус, тоді як груба грануляція призводить до хрусткої текстури продукту. На відміну від цангових екструдерів, які вимагають грубої грануляції, двошнекові екструдери є більш універсальними і можуть обробляти як дрібну, так і грубу грануляцію борошна. Очищена кукурудза розширюється більше, ніж цільна кукурудза, тому її частіше використовують у сухих сніданках та екструдованих закусках, які вимагають певного ступеня розширення. Пшеничне борошно знайшло корисне застосування в різних екструдованих продуктах, включаючи макарони, запечені або смажені закуски, ароматизовані крекери і хліб. Крупна манка з твердої пшениці має коефіцієнт розширення і насипну щільність, подібну до кукурудзяного борошна, в результаті чого виходять вироби з хрусткою текстурою. Завдяки своїй чудовій засвоюваності рисове борошно широко використовується в рецептурах дитячого харчування, а також може служити важливою альтернативою пшениці для людей з непереносимістю глютену. Битий рис, який є побічним продуктом помелу, є дешевшою альтернативою. Однак білки рису виявляють слабкі функціональні властивості під час обробки, порівняно з іншими рослинними білками. Овес також може бути диференційований за складом ендосперму зерна та морфологією. Вівсяний крохмаль вимагає відносно низької температури клейстеризації, однак через слабе розширення він не ідеально використовується в розширених продуктах або використовується при дуже низьких рівнях.

1.3 Обладнання для холодної та гарячої екструзії

Екструдер – це пристрій, який використовується для надання форми шляхом виштовхування матеріалу з певного типу матриці або отвору. Екструдер – це термодинамічний агрегат. Для роботи обертового шнека екструдера він складається з джерела живлення, а обертовий шнек оточений бочкою та сировиною подачі. Обертові шнеки переносять оброблену сировину в отвір або матрицю, яка надає форму виробу. Нагрівання, змішування, подача попередньо подрібненого інгредієнтів здійснюється за допомогою різноманітних процесів, які надходять через шнек.

Існують різні типи деталей екструдера відповідно до конфігурації матриці, шнека і ствола. Використання кожної частини екструдера буде залежати від використовуваної сировини та типу кінцевого продукту. У бочці екструдера є обертові шнеки, які переносять матеріал через бочку і рівномірно перемішують матеріал на різні види. При холодному методі екструзії тепло не

					ДонНУЕТ.133.ГМБ-23м.2024.ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		13

потрібне, воно лише надає продукту форми, застосовуючи тиск, матеріал вивантажується з бочки через конкретний тип матриці. У варильному екструдері матеріал, який присутній в бочці, нагрівається за рахунок тертя і він піднімається вгору і проходить з матриці під тиском. Деякі продукти для сніданку мають хрустку та легку текстуру і вони швидко розширюються за рахунок виходу пари через тиск, коли матеріал піднімається вгору через матрицю.

Екструдери можна класифікувати на поршневі, роликові або шнекові екструдери на основі механізму транспортування. Для харчової промисловості найбільш поширеними є шнекові екструдери, які можуть включати одно-, дво- або кілька шнеків, які обертаються в нерухомій бочці. Незалежно від конструкції або типу, принципи роботи екструдерів схожі. У своїй найпростішій формі шнековий екструдер складається з обертового прольоту або шнека Архімеда, який щільно прилягає до нерухомої бочки з матрицею на розвантажувальному кінці [2-6]. Сировина, як правило, набір змішаних, попередньо кондиціонованих інгредієнтів подається в бочку через бункер і транспортується шнеками вздовж бочки. Спеціальна за конструкцією матриця надає виробу форму, оскільки вона виходить зі ствола. Екструдери з одношнековою конструкцією є обладнанням, яке придатне для недорогої переробки менш складних інгредієнтів, тоді як більш складні двошнекові екструдери мають здатність обробляти більш різноманітні рецептури сировини з постійною пропускну здатністю.

Класифікація екструдерів заснована на двох категоріях: експлуатація та конструкція.

Виходячи з операції: гарячий екструдер та холодний екструдер.

В залежності від типу екструзії екструдери поділяються на двошнекові та одношнекові.

Холодна екструзія. Підвищені температури варіння, що використовуються при звичайній екструзії, призводять до знебарвлення сироваткових білків, руйнування амінокислот, цистеїну і метіоніну, а також до інших проблем. При холодній екструзії нагрівання продукту здійснюється до 100°C, зване холодною екструзією. При холодній екструзії температура продукту постійна, використовується для формування та змішування продукту, включаючи м'ясні продукти та макарони. Температура менше 100°C також використовується для екструзії під низьким тиском, наприклад, корми для домашніх тварин. Способи охолодження, випічки або сушіння застосовують для консервації холодних екструдованих продуктів [1-5]. У той час екструзійне приготування виключає забруднення мікроорганізмів і зберігає сухі продукти харчування на більш тривалій термін. Упаковка сухих продуктів перешкоджає окисленню і вбиранню вологи при зберіганні. Холодні екструдери підходять для дрібної промисловості, а також для побутового використання. Плити-екструдери використовуються тільки великими промисловими підприємствами, оскільки вони мають високу вартість. Основне використання холодних екструдерів полягає у створенні макаронних виробів, хоча аналогічні машини використовуються для формування тіста для рулонів у різні форми. Екструдер для макаронних виробів використовується для виготовлення широкого

					ДонНУЕТ.133.ГМБ-23м.2024.ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		14

асортименту макаронних виробів з використанням суміші, виробленої з борошна твердих сортів пшениці або манної крупи та яєць (рис. 1.2). Шляхом додавання томатного пюре або шпинатної пасти також виготовляється кольорова паста.

Існують різні типи екструдерів, які використовуються в дрібномасштабному виробництві та точках харчування, від ручного керування до повністю автоматичних машин. Екструдер для макаронних виробів має різні частини, такі як матриця, стовбур екструдера та змішувальна камера, які використовуються для виготовлення пасти певної форми. Багато компаній-виробників обладнання виготовляють матрицю з пластику, нержавіючої сталі або віддають перевагу бронзі, яка гарантує, що вона надає макаронним виробам жорстку поверхню, яка зберігає соус кращим за будь-які макарони, виготовлені за різними технологіями. Сировина нарізаються певного розміру і форми після підйому з матриці. Макарони не тільки відразу варяться, але і сушаться для роздрібного продажу та зберігаються до півроку.



Рисунок 1.2 – Пастоподібний екструдер

Гаряча екструзія. Гаряча екструзія також відома як екструзійна кулінарія, при якій нагрівання продукту здійснюється при температурі понад 100°C . Для швидкого підвищення температури використовується фрикційний нагрів та інші способи нагрівання. Після нагрівання продукту його передають на бочкові секції, які мають невеликий виліт, що сприяє збільшенню зсуву і тиску. Нарешті, продукт пропускається з матриці під тиском, після остаточного формування продукт швидко охолоджують для видалення вологи у вигляді пари. Продукт формується у вигляді багатьох типів форм, таких як мушлі або білки, пончики, смужки, палички, трубочки та сфери. За допомогою екструзійної кулінарної обробки утворюються різні види харчових продуктів, у тому числі повітряні крупи, розширені закуски тощо. Екструдери – це одношнекове або двошнекове обладнання. Двошнековий екструдер не доступний для невеликих галузей промисловості, оскільки він має високе технічне обслуговування та капітальні витрати порівняно з одношнековим екструдером. Одношнековий екструдер представлений на рис. 1.3.

					ДонНУЕТ.133.ГМБ-23м.2024.ПЗ	Арк.
						15
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		



Рисунок 1.3 – Одношнековий екструдер

Одношнековий екструдер містить один шнек, який безперервно обертається в бочці, і вони бувають різних типів. Одношнекові екструдери, які регулярно використовуються, мають стабільний крок. Використовувана технологічна сировина і робочий стан в бочці є основним фактором, що контролює якість і вид екструдованих харчових продуктів, які виготовляються методом гарячої екструзії.

Всі одношнекові екструдери мають кілька загальних характеристик. Основні секції екструдера включають бочку, шнек, який поміщається всередину бочки, систему мотор-привід для обертання шнека, а також систему управління нагрівачами бочки та швидкістю двигуна. Багато інновацій у конструкції цих компонентів були розроблені постачальниками машин протягом багатьох років. Бункер прикріплений до стовбура на вхідному кінці шнека і сировина або подається гравітаційно у секцію подачі шнека, або дозується через бункер до шнекових проходів. Сировина може бути як у вигляді твердих частинок, так і в розплавленому [10]. Якщо сировина знаходиться в твердій формі, як правило, гранули (або порошки), шнек екструдера спочатку повинен відвести гранули від отвору для подачі, розплавити сировину, а потім перекачати та створити її під тиском протягом подальшої роботи процесу. Бочка зазвичай нагрівається мінімум з трьома температурними зонами. Ці різні температурні зони узгоджуються з функціями шнека: транспортуванням твердих речовин, плавленням і перекачуванням або дозуванням сировини.

Процес одношнекової пластифікації починається зі змішування вихідних матеріалів. Як правило, в бункер додають кілька різних вихідних сировини. Часто ці компоненти потрібно висушити та змішати перед додаванням їх у бункер. Далі вихідна сировина самопливом надходить з бункера через завантажувальну горловину корпусу подачі в секцію транспортування твердих речовин шнека. Така подача оболонки охолоджується за допомогою води. Секція подачі шнека зазвичай розроблена з постійною глибиною і становить приблизно від 4 до 8 діаметрів стовбура по осевій довжині. Безпосередньо після секції транспортування твердих речовин знаходиться ділянка, де глибина каналу звужується до ділянки для вимірювання невеликої глибини. Секцію

					ДонНУЕТ.133.ГМБ-23м.2024.ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		16

конічної глибини прийнято називати перехідною або плавильною секцією. Загалом, ділянка дозування також є постійною глибиною, але існує багато варіацій де канали коливаються в глибину. Дозуюча секція перекачує та створює тиск у матеріалі для роботи нижчестоящого блоку, включаючи статичні змішувачі, пристрої сітчастої фільтрації, шестеренні насоси, вторинні екструдери та матриці.

Загальна довжина шнека екструдера та стовбура зазвичай вимірюється в діаметрах стволів або у співвідношенні довжини до діаметра (L/D). Довжини перерізів часто вказуються в діаметрах бочок або просто діаметрах. Екструдер має дві основні відмінності: на кінчику гвинта є зворотний клапан і шнек втягується в міру накопичення розплавленого матеріалу між зворотним клапаном і торцем бочки. Тиск на накопиченому матеріалі підтримується за рахунок постійної сили, що прикладається до хвостовика шнека через систему приводу. Ця сила зазвичай вимірюється як тиск, прикладений до хвостовика, і називається «протитиском». Під час етапу інжекції процесу гвинт виштовхується вперед, зворотний клапан закривається і матеріал впорскується в форму.

Компанія Shandong Light випускає екструдери серії LT, продуктивність яких варіюється від 80-700 кг/год, а також екструдери моделі LTTS, що відрізняються обертовою формуючою головкою для виробництва снєків спіралеподібних форм. Відмінною особливістю одношнекових екструдерів серії LT є циклічна система охолодження корпусу та шнека екструдера. Компанія Ravan виробляє одношнекові екструдери моделей F та G200 для виробництва снєків із зерен та картопляних пластівців. Корпус екструдера G200 має шість незалежних зон регулювання температури, що дає можливість точно підбирати технологічні режими для кожної зони робочої камери (рис. 1.4).

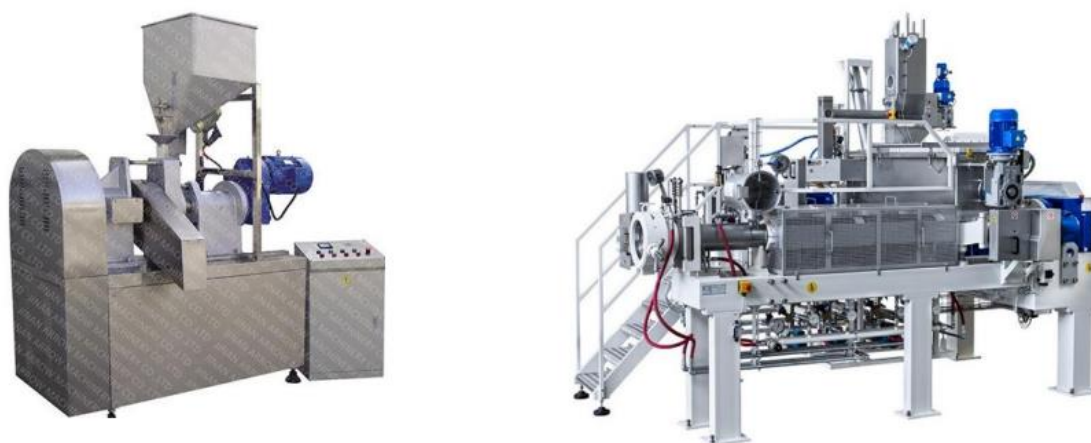


Рисунок 1.4 – Екструдери LTTS-I та G200

Компанія Jinan Saixin Machinery виробляє одношнекові екструдери для виробництва сухих сніданків, снєків, локшини швидкого приготування та кормів для домашніх тварин. Екструдери моделі SX3000-100 мають продуктивність 80-120 кг/год, модель DX3000-130 забезпечує продуктивність 100-250 кг/год, обидві моделі оснащені пристроєм різання та системою термостатування (рис. 1.5). Так само компанія пропонує одношнекові

					ДонНУЕТ.133.ГМБ-23м.2024.ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		17

екструдери з коротким шнеком без системи нагрівання серії GJQ з продуктивністю 80-500 кг/год для виробництва прямоекспандованих снєків та екструдери з поворотною голівкою для отримання виробів у вигляді спіралей продуктивністю 120-150 кг/год [3].



Рисунок 1.5 – Екструдери серії 2000, MS3000 та SLG75

Компанія Wenger випускає одношнекові екструдери серій Optima та Form. Екструдери Form з низьким зсувним зусиллям призначені для надання форми зерновій сировині, що пройшла попередню термомеханічну обробку. Екструдери серії Optima відрізняються широким діапазоном продуктивності від 200 до 20000 кг/год і високою стійкістю до зношування шнека і ребристою внутрішньої поверхнею корпусу [4]. Компанія Buhler випускає екструдери для виробництва сухих сніданків текстурованих рослинних білків та кормів для тварин. Особливістю екструдерів компанії є наявність виштовхувача, який дозволяє виштовхнути без розбирання корпусу та пошкодження навіть сильно затиснуті шнеки, а також можливість бокового переміщення вузла різання [5].

Два обертових паралельних шнека однакової довжини присутні в стовбурі двошнекового екструдера. Двошнековий екструдер складніший, ніж одношнекові екструдери та забезпечує значно кращий контроль і більшу адаптивність. Потік продукту буде рівномірним через бочку в результаті позитивного нагнітання шнекових вильотів (рис. 1.6).



Рисунок 1.6 – Двошнековий екструдер

Види екструдованих харчових продуктів:

					ДонНУЕТ.133.ГМБ-23м.2024.ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		18

1. Продукти на основі крохмалю.
2. Продукти на основі цукру.
3. Продукти на основі зернових культур.
4. Продукти на основі білка.

Технологія екструзії має особливе значення в харчовій промисловості завдяки її застосуванню в харчовому виробництві, низькій вартості, більш високій продуктивності, гнучкості і якості продукції в порівнянні з іншими технологіями.

Серед багатьох технологій, що використовуються в харчовій промисловості, екструзія має особливе значення. Було помічено, що ця інноваційна технологія використовується для переробки багатьох снекових продуктів, які зазвичай готуються із сухих сніданків. Метод використовується через багато позитивних ефектів, таких як руйнування харчових факторів, збереження ліпідів, знищення заражених мікробів і збільшення кількості розчинних харчових волокон. Екструзія має два різні методи, серед яких холодна екструзія краща, оскільки втрати поживних речовин менші завдяки меншій температурі. Технології екструзії мають великий потенціал для використання в харчовій промисловості. Необхідні подальші дослідження в контексті харчових якостей екструдованого продукту та ефективності екструзії.

На основі вище зазначеного можна вважати, що екструзія – це виробничий процес, який використовується для надання сировині потрібної форми. Екструзія визначається як система виштовхування змішаних інгредієнтів через невеликий отвір, званий матрицею, для формування та надання форми сировині. У харчовій екструзії беруть участь як фізичні, так і хімічні процеси. Технологія екструзії в основному використовується в сучасній харчовій промисловості завдяки якості продукції, багатофункціональності, універсальності, низькій вартості, високій продуктивності енергії та екологічності. При екструзійному варінні крохмалистий, зволожений і білковий харчовий матеріал обробляється за допомогою застосування механічного зсуву, тепла і тиску. Цей процес здійснюється за допомогою стовбура і шнекового механізму.

Зазначено, що холодна екструзія та гаряча екструзія це два типи методів екструзії в технології екструзії. За допомогою процесу гарячої екструзії виробляються різні види харчових продуктів, в яких вилучають продукти від сої, хрусткі снеки на основі злаків, їжу та кондитерські вироби на основі цукру. Гаряча екструзія також відома як екструзійне варіння. Холодна екструзія, з іншого боку, не вимагає попереднього нагрівання, оскільки сировина залишається непорушною у своїй первісній цілісності, перш ніж потрапити в матрицю, де вона піддається екстремальному тиску. Обладнання, яке використовується як для гарячого, так і для холодного методу екструзії, відоме як екструдер.

Гаряча екструзія та холодна екструзія – це два методи, які використовуються для надання форми сировині. Хоча кінцевою метою є досягнення бажаної форми, відмінності між цими двома процесами можуть бути досить значними. Гаряча екструзія передбачає нагрівання перед потраплянням у матрицю, що дозволяє здійснювати більший контроль над її

					ДонНУЕТ.133.ГМБ-23м.2024.ПЗ	Арк.
						19
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

деформацією, а холодна екструзія, з іншого боку, не вимагає попереднього нагрівання. Таким чином, холодна екструзія має тенденцію отримувати міцніші та стабільніші компоненти, ніж гаряча екструзія, через обмежену швидкість деформації. Оскільки обидва методи дозволяють виробляти високоякісні вироби, це значною мірою зводиться до характеру виробу, що виробляється, а також до його передбачуваного застосування, щоб визначити, який тип екструзії слід використовувати.

Екструдер – це пристрій, який використовується для надання форми шляхом виштовхування матеріалу з певного типу матриці або отвору. Екструдер – це термодинамічний агрегат. Для роботи обертового шнека екструдера він складається з джерела живлення, а обертовий шнек оточений бочкою та сировиною подачі. Оберткові шнеки переносять оброблену сировину в отвір або матрицю, яка надає форму виробу. Нагрівання, змішування, подача попередньо подрібнених інгредієнтів здійснюється за допомогою різноманітних процесів, які надходять через шнек.

Існують різні типи деталей екструдера відповідно до конфігурації матриці, шнека і ствола. Використання кожної частини екструдера буде залежати від використовуваної сировини та типу кінцевого продукту. У бочці екструдера є обертові шнеки, які переносять матеріал через бочку і рівномірно перемішують матеріал на різні види. При холодному методі екструзії тепло не потрібне, воно лише надає продукту форми, застосовуючи тиск, матеріал вивантажується з бочки через конкретний тип матриці. У варильному екструдері матеріал, який присутній в бочці, нагрівається за рахунок тертя і він піднімається вгору і проходить з матриці під тиском. Деякі продукти для сніданку мають хрустку та легку текстуру і вони швидко розширюються за рахунок виходу пари через тиск, коли матеріал піднімається вгору через матрицю.

Екструдери можна класифікувати на поршневі, роликові або шнекові екструдери на основі механізму транспортування. Для харчової промисловості найбільш поширеними є шнекові екструдери, які можуть включати одно-, дво- або кілька шнеків, які обертаються в нерухомій бочці. Незалежно від конструкції або типу, принципи роботи екструдерів схожі. У своїй найпростішій формі шнековий екструдер складається з обертового прольоту або шнека Архімеда, який щільно прилягає до нерухомої бочки з матрицею на розвантажувальному кінці. Сировина, як правило, набір змішаних, попередньо кондиціонованих інгредієнтів подається в бочку через бункер і транспортується шнеками вздовж бочки. Спеціальна за конструкцією матриця надає виробу форму, оскільки вона виходить зі ствола.

Вважається, що серед багатьох технологій, що використовуються в харчовій промисловості, екструзія має особливе значення. Метод використовується через багато позитивних ефектів, таких як руйнування харчових факторів, збереження ліпідів, знищення заражених мікробів і збільшення кількості розчинних харчових волокон. Технології екструзії мають великий потенціал для використання в харчовій промисловості.

					ДонНУЕТ.133.ГМБ-23м.2024.ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		20

РОЗДІЛ 2 УДОСКОНАЛЕННЯ ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ ЗДІЙСНЕННЯ ПРОЦЕСУ ЕКСТРУЗІЇ

2.1 Параметри екструзії та змінні процесу

Під час екструзії сировина протікає в різних умовах через фігурні отвори (матрицю) із заданою швидкістю для досягнення різної форми продуктів. Екструзійне приготування продуктів практикується вже понад 50 років. Харчовий екструдер, який спочатку обмежувався змішуванням і формуванням макаронів і готових до вживання зернових гранул, тепер вважається високотемпературним біореактором з коротким часом, який перетворює сирі інгредієнти в модифіковані проміжні та готові продукти [11]. Під час екструзії термічна та зсувна енергії застосовуються до сирих харчових матеріалів, викликаючи структурні, хімічні та харчові перетворення, такі як желатинізація та деградація крохмалю, денатуралізація білків, окислення ліпідів, деградація вітамінів, утворення ароматизаторів, підвищення вмісту мінералів та розчинності харчових волокон.

Екструзійне приготування стає популярним серед інших поширених методів обробки завдяки автоматизованому контролю, високій потужності, безперервній роботі, високій продуктивності, універсальності, адаптивності, енергоефективності, низькій вартості. Крім того, це також дозволяє проектувати та розробляти нові харчові продукти, високу якість продукції, унікальні форми та характеристики продукту, економію енергії. Екструзійне приготування також допомагає змінити структуру, покращуючи розчинність, силу набухання, в'язкість гідратації води та здатність утримувати воду. Також збільшує вміст розчинної клітковини у волокнистих матеріалах, таких як матеріали, які багаті клітинною стінкою рослин, висівки та лушпиння різних злаків та бобових.

Екструдери харчових продуктів забезпечують термомеханічний зсув, який необхідний для викликання фізико-хімічних змін сировини з інтенсивним перемішуванням для диспергування і гомогенізації. Екструзія – це термічна обробка, яка передбачає застосування високої температури, високого тиску та зсувних сил до сировини, наприклад до зернових продуктів. Час перебування, температура, тиск та зсув характеризують екструзійне приготування харчових матеріалів. Придатність екструдованих харчових продуктів для конкретного застосування залежить від їх функціональних властивостей, таких як водопоглинання, розчинність у воді та індекси поглинання, індекс розширення, насипна щільність та в'язкість.

Залежно від матеріалів сировини та бажаних властивостей продукту, екструдери для харчових продуктів можуть працювати при низькому зсуві, що

					ДонНУЕТ.133.ГМБ-23м.2024.ПЗ		
<i>Зм.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>			
<i>Розроб.</i>	<i>Бельговський</i>				<i>Літ.</i>	<i>Арк.</i>	<i>Аркушів</i>
<i>Перевір.</i>	<i>Цвіркун</i>					21	16
<i>Н. Контр.</i>	<i>Омельченко</i>				ДонНУЕТ Кафедра ЗІДО		
<i>Затверд.</i>	<i>Хорольський</i>						

підходить для макаронних виробів та обробленого м'яса, середньому зсуві, який підходить для м'ясних аналогів, або високому зсуві, необхідному для розширених закусок, текстурованих рослинних білків та готових до вживання сухих сніданків. Екструдери з низьким зсувом і нижчою механічною енергією використовуються в основному для змішування та формування, тоді як екструдери з високим зсувом призначені для використання високої механічної енергії для переробки, яка вимагає тепла [2-4]. Екструдовані продукти можуть зазнавати кілька фізико-хімічних та харчових змін, залежно від процесу та кормового матеріалу. До таких змін відносять окислення ліпідів, денатурацію і перехресне зшивання білків, желатинізацію і декстринізацію крохмалю, деградацію вітамінів і денатурацію ферментів, потемніння і смакоутворення.

Властивості одержуваного продукту складаються з усіх цих складних змін на які впливають умови обробки. Властивості сировини, зокрема, тип матеріалу, фізичний стан, хімічний склад, включаючи вологість, вміст крохмалю, білків, жирів і цукру, а також рН сировини є найбільш значущими, тоді як температура та тиск у бочки, конфігурація шнека та швидкість обертання, діаметр матриці та сила зсуву є важливими умовами процесу. Фактори процесу, включаючи вміст вологи, температуру та час, часто оптимізуються, щоб мінімізувати негативний вплив на якість харчування. Оскільки екструзія є гнучким методом обробки, для досягнення необхідних характеристик продукту можуть бути зроблені автоматичні модифікації в режимі он-лайн, і кілька різних продуктів, починаючи від високов'язких або вологих і закінчуючи відносно сухими матеріалами, можуть бути виготовлені з використанням одного і того ж обладнання. Отже, технологія екструзії дозволяє швидко та ефективно перетворювати різну сировину в різноманітні смакові харчові продукти шляхом простої зміни рецептури корму та умов експлуатації на одному та ж обладнанні. Різні групи продуктів харчування, включаючи бобові та олійні культури, м'ясні та рибні продукти, коренеплоди та бульби, фрукти та овочі знайшли корисне застосування в екструзійній переробці [2].

1. Вплив параметрів процесу екструзії на якість екструдованої технології екструзії дозволяє виробляти харчовий продукт за допомогою безперервного, економічного процесу, який забезпечує якісну консистенцію готового продукту. Це досягається за рахунок домінування численних параметрів технології екструзії. Технологія екструзії також розробила новий якісний харчовий продукт і переробила кілька методів виробництва снєків. Реакції відбуваються в різних хімічних речовинах всередині екструдера та є результатом процесу екструзії. Ця реакція відбувається в основному в кінці матриці і стовбура екструдера.

Вплив технології екструзії на харчовий продукт:

- інактивація сирого ферменту;
- природне руйнування токсинів;
- зниження мікробного навантаження готового продукту;
- процеси екструзії перетворюють складні крохмалі в просту форму.

2. Поживні властивості. Вплив на білок і амінокислоти, засвоюваність білка екструдованого харчового продукту розширюється за рахунок технології екструзійного приготування. Екструдовані харчові продукти, які приготовані зі

					ДонНУЕТ.133.ГМБ-23м.2024.ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		22

злаків, багаті незамінною амінокислотою, якою є лізин. У зв'язку з цим особливе значення має акцент на збереженні лізину при методі екструзії.

3. Вуглеводи, а саме цукри, включаючи сахарозу, фруктозу і лактозу є хорошим джерелом миттєвої енергії. Цукор надає солодкуватий смак харчовому продукту. Цукри відповідають за деякі хімічні реакції, що відбуваються в процесі екструзії. Необхідно контролювати цукор в процесі екструзії для збереження поживних і органолептичних властивостей екструдованого харчового продукту. Процес екструзії призводить до втрати деякої кількості цукру. Саме за рахунок сахарози відбувається перетворення фруктози і глюкози в реакції з білком і цукром. Якість деяких екструдованих харчових продуктів на основі бобових підвищується за рахунок облітерації деяких олігосахаридів.

4. Крохмаль. У процесі екструзії крохмалі піддаються термічному впливу, механічному зсуву і тиску. Крохмаль складається з глюкозних одиниць, з'єднаних гліюзидним зв'язком. Амілопектин і амілоза є молекулами крохмалю. Амілопектин і амілоза відповідають за в'язкість і клейстеризацію приготовленої пасти. Атомна маса молекул крохмалю пшеничного борошна зменшується під впливом живильної вологи і низької температури матриці.

5. Харчові волокна. Розчинність продукту цукрових буряків у воді збільшується екструзією, завдяки чому зменшується субатомна маса частинок геміцелюлози та пектину. Обробка продукту двошнековим екструдером змінює вміст харчових волокон. Було встановлено, що більш висока температура буде призводити до більш високого вмісту харчових волокон у пшениці. Екструзійна кулінарія також збільшила кількість харчових волокон в екструдованому ячмені. Розчинні харчові волокна воскового ячменю збільшуються за рахунок збільшення загального обсягу харчових волокон.

6. Ліпіди. Процес екструзії допомагає завдяки наявності ліпідів, які можуть бути присутніми в інгредієнтах, а також їх можна додавати зовнішньо. Крутий момент зменшується в міру того, як ліпід буде зменшувати ковзання в стовбурі. Це призведе до поганого розширення продукту в результаті недостатнього тиску. Під час екструзії температура висока, що призведе до виділення ліпідів. Ліпіди також виділяються під час екструзії через механічне порушення клітинних стінок.

7. Функціональні властивості екструзії дуже сильно залежать від крохмалю, його вид і кількість вплине на загальну екструзію. Вологість екструзії становить від 25 до 30% з часом перебування від 30 до 90 с. Вміст вологи і час перебування змінюють фізико-хімічні властивості, харчову цінність і органолептичні показники, отже, змінюється і якість продукту. Насипна щільність, колір, коефіцієнт розширення, індекс розчинності у воді, твердість, індекс міцності та індекс водопоглинання є фізичними властивостями екструдованої сировини.

8. Коефіцієнт розширення. Зі зменшенням вологості матеріалу, що подається, збільшується швидкість обертання шнека, коефіцієнт розширення і температура стовбура. Коефіцієнт розширення екструдованого харчового продукту різко знижується при збільшенні вологості сировини. Температура бочки, швидкість обертання шнека разом із вмістом вологи впливатимуть на

					ДонНУЕТ.133.ГМБ-23м.2024.ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		23

коефіцієнт розширення майже всіх екструдованих продуктів. Більш висока вологість входів призведе до значного зниження коефіцієнта розширення. Збільшення частоти обертання шнека і температури ствола призводить до високого розширення і низького розширення за рахунок збільшення вмісту вологи.

9. Насипна щільність. Щільність екструдованого харчового продукту на вплив вільного фактору, такого як вміст вологи, температури та швидкість шнека, яка обернено пропорційна коефіцієнту розширення. Підвищення частоти обертання шнека і бочки обумовлює зниження насипної щільності екструдованого харчового продукту. Висока вологість екструдованого харчового продукту також впливає на насипну щільність екструдованого продукту. Величина сипучої щільності текстурованого рису збільшується за рахунок клейстеризації крохмалю і низької частоти обертання шнека, яка знаходиться в межах від 20,1 до 32,6 об/хв. Швидкість шнека разом з температурою подачі впливає на насипну щільність екструдованого продукту.

10. Індекс водопоглинання. Більш висока клейстеризація призводить до більшого розширення екструдованих продуктів. Висока механічна частка також впливає на процес водопоглинання. Високі температури збільшують декстринізацію, що може призвести до збільшення водопоглинання. Чим вище кількість вмісту вологи в продукті, тим нижче буде водопоглинання так як вода, присутня в продукті, не буде вбирати більше води. Температура ствола і швидкість обертання шнека також позитивно вплинуть на водопоглинання. Позитивний вплив підвищення температури водопоглинання в основному пов'язаний з більшою кількістю деградації крохмалю.

11. Індекс розчинності у воді. Індекс розчинності у воді екструдованого продукту зменшується при збільшенні вологості екструдованого і збільшується зі збільшенням температури та швидкості обертання шнека. При підвищенні температури бочки вона збиває показник розчинності у воді. Клейстеризація крохмалю збільшується на температуру, яка збільшує кількість розчинних крохмалів, що викликає підвищення розчинності.

12. Твердість. Більш висока твердість через підвищення температури стовбура і більш низька твердість за рахунок збільшення частоти обертання шнека. Підвищення вмісту вологи призвело до зниження жорсткості. Нижча щільність сировини спричиняє збільшення швидкості обертання гвинта зі зниженням твердості, а високе розширення при підвищеній температурі спричиняє вплив на твердість через температуру.

13. Вологість продукту. Вологість продукту залежить від багатьох факторів, серед яких основним фактором є початкова вологість вхідного матеріалу. Вона прямо пропорційна вологості продукту. Також було помічено, що температура, яка використовується для екструзії, обернено пропорційна вологості кінцевого продукту. Більш висока температура екструзії дозволить знизити вологість кінцевого продукту [1]. Хрусткість харчового продукту повністю залежить від вологості харчового продукту. Висушені екструдовані харчові продукти мають низьку активність води в межах 0,1-0,33, що сприяє зниженню мікробного навантаження і збільшує термін придатності харчового продукту.

					ДонНУЕТ.133.ГМБ-23м.2024.ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		24

Параметри якості харчового продукту, включаючи ступінь приготування і коефіцієнт розширення, обумовлені перетравністю і всмоктуванням, специфічно пов'язані з вологістю продукту. Температура сировини знижується за рахунок вологи, присутньої в екструдері. Менша в'язкість продукту викликає підвищення тиску за рахунок зниження температури розплаву. Висока екструзія зсуву та підвищена швидкість зсуву зменшують вплив вмісту вологи на продукт, але призводять до нестабільності продукту. Високий вміст вологи в пухких харчових продуктах викликає товсту клітинну стінку і підвищує твердість. Волога впливає на коефіцієнт розширення і межу утримання води екструдованих виробів.

Важливими також є швидкість шнека, швидкість подачі та геометрія матриці, які контролюють механічну історію та час перебування матеріалу в екструдері. На якість готової продукції припадає кілька умов екструзійної обробки. Контроль швидкості подачі, швидкості обертання шнека, температури ствола і тиску в стволі разом з вищезазначеними критичними параметрами буде визначати хрусткість, твердість і різні інші характеристики, які будуть впливати на якість продукту. Під час екструзії висока температура і великі сили зсуву викликають розпад четвертинної і третинної структури, а взаємодії між компонентами продукту збільшують вологість, що додатково впливає на реологічну поведінку харчового матеріалу в екструдері за рахунок зменшення навантаження на зсув. Екструзія з низькою вологістю збільшує розширення екструдату.

2.2 Конструкційні особливості шнека екструдера

Ключовим елементом процесу екструзії є шнек екструдера, який змушує сировину потрапляти в зменшуваний простір уздовж гвинта при більш високих температурах. Там спресований матеріал виштовхується вгору до нагрітої ємності (бочки). Стиснення витісняє повітря з бункера та розплавляє матеріал, штовхаючи матеріал до гарячої металевої бочки. Щільний/розплавлений матеріал безперервно перекачується вперед через формувальну матрицю. Матеріал виходить із матриці, де він витягується у вільному розплавленому стані через охолоджуюче середовище до твердого стану, постійно витягуючи.

Хоча можна розглянути безліч варіацій, але класичний гвинт має постійний діаметр. Довжина сучасного шнека зазвичай в 24-50 разів перевищує його діаметр. Це виражається як відношення довжини до діаметра або відношення L/D. Гвинти, найчастіше, виготовляються з цільного шматка сталі, який потім полірується. Прольоти наземні і щільно прилягають до стовбура. Як правило, нероз'ємний шнек приводиться в рух справа через простий ключ на валу, який входить в шестеренчастий редуктор екструдера. Гвинт загального призначення має крок польоту, що дорівнює діаметру шнека. Класичний шнек загального призначення складається з трьох частин (секції подачі, стиснення та дозатора) всі однакової довжини (рис. 2.1).

1. Секція шнекової подачі. Глибина каналу подачі (і, отже, діаметр кореня) постійні і пов'язані з транспортуванням речовин. Тому температура в секції подачі зазвичай встановлюються нижче температури плавлення

					ДонНУЕТ.133.ГМБ-23м.2024.ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		25

сировини. Якщо температура встановлена занадто висока то сировина може розплавиться, а транспортування (подача) припиниться, оскільки матеріал буде прилипати до шнека, а не транспортуватися по ньому. Тиск у кормі зазвичай дуже низький і часто дорівнює нулю, оскільки шнек діє як конвеєр. Транспортування твердих речовин потребує малого крутного моменту, тому на нього припадає невеликий відсоток від загального навантаження двигуна

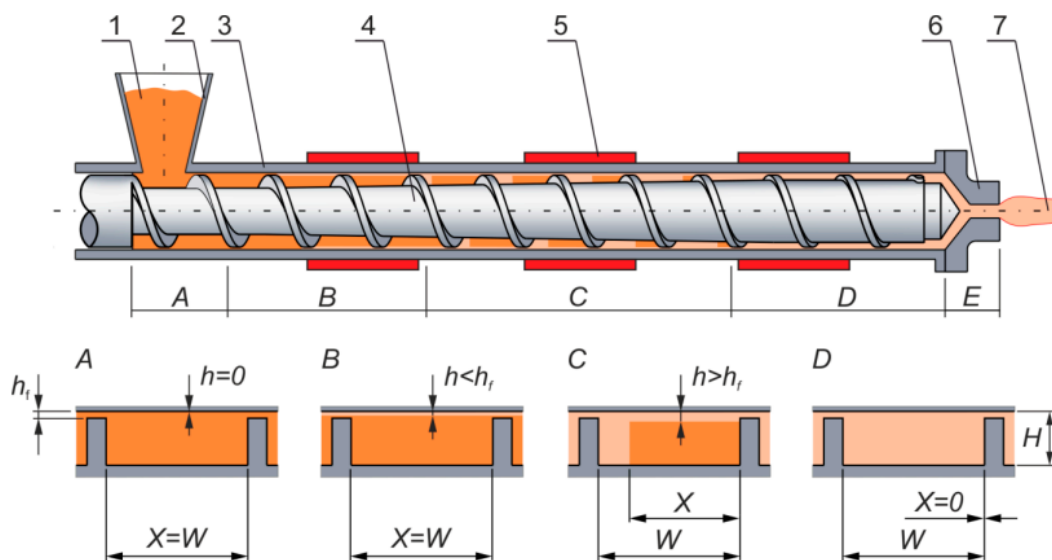


Рисунок 2.1 – Схема процесу екструзії

На рисунку 2.1 представлено: 1 – сировина, 2 – бункер, 3 – бочка, 4 – шнек, 5 – нагрівачі, 6 – матриця, 7 – екструдат, А – зона подачі (транспортування), В – зона передплавлення (зона затримки), С – зона стиснення, D і E – зона дозування, X – ширина твердого шару, W – ширина шнекового каналу, H – висота шнекового каналу, ВЧ – зазор між шнеком і стволем.

Перепади температури можуть спричинити складні зміни в поведінці екструзії. Вони можуть змінювати тертя стовбура, яке є рушійною силою для транспортування сировини вздовж гвинта, який чинить опір потоку. Тому температура подачі зазвичай оптимізована для контролю транспортування відповідної сировини. Це забезпечує найбільш рівномірну стабільність тиску, яка зазвичай вимірюється на виході зі ствола. Коли тиск нестабільний, кажуть, що екструдер «стрибає», оскільки зміни тиску в бочці спричиняють зміни у потужності. Зміна температури секції подачі змінює величину попереднього підігріву сухих речовин. Вищі температури попереднього нагріву (особливо в менших екструдерах) можуть означати легшу деформацію матеріалу в межах спадаючого каналу зони стиснення (пластифікації) і більш низький крутний момент, який можна розглядати як зниження навантаження на двигун [13-15]. Основною метою одношнекових екструдерів є забезпечення відмінної однорідності сировини при високих швидкостях виробництва та належних температурах розряду. Погано перемішані маси, швидше за все, спричинять дефекти у вироблених виробах, збільшуючи рівень браку. Як правило,

одношнекові екструдери використовуються для декількох застосувань змішування. Загальна мета змішування полягає в тому, щоб зменшити неоднорідність системи, що складається з двох або більше речовин. Дуже критичним параметром, який не пов'язаний строго з наявністю декількох компонентів, але також сильно залежить від продуктивності змішування машини, є теплова однорідність розряду. Поле потоку в гвинтовому каналі часто схильне до високих швидкостей деформації, що викликає надмірний зсув і розтягнення. За рахунок внутрішнього тертя між сусідніми рідинними елементами механічна енергія перетворюється в теплову, що призводить до нерівномірного підвищення температури сировини. Пом'якшення температурних градієнтів в розряді вкрай важливо для усунення поверхневих дефектів, зниження усадки і викривлення, а значить, і збереження високої якості продукції.

При одношнековій екструзії змішування відбувається в кілька етапів. За винятком зони транспортування, де перемішування не відбувається, процес змішування поширюється від зони стиснення до кінця екструдера. Основна мета шнеків полягає в прискоренні процесу плавлення. Оскільки змішування вимагає, щоб сировина знаходилася в розплавленому стані, чим раніше завершиться плавлення, тим вище ймовірність досягнення ідеального змішування. Процес змішування триває в міру того, як потік сировини перекачується і створюється під тиском в зоні дозування відповідної форми та розміру. Змішування в одношнекових екструдерах, як правило, схильне до значної нерівномірності, що пов'язане зі швидкістю потоку.

$$V_z = V \cos \theta$$

Об'ємна швидкість потоку від опору [7]:

$$Q_D = W \int_0^H v(y) dy$$

Для ньютонівської рідини профіль швидкостей є лінійним [7]:

$$v(y) = V_z \frac{y}{H}$$

$$Q_D = \frac{WV_z}{H} \int_0^H y dy = \frac{WV_z}{H} \frac{H^2}{2} = \frac{WV_z H}{2}$$

Не слід припускати, що однорідна суміш в бункері дійде до каналу шнека в тій же однорідній суміші. Переважна подача (через розмір інгредієнта або геометрію), рух шнека або вібрація можуть змінити ідеально однорідну суміш і видалити її, перш ніж вона досягне каналу шнека. Це можна вирішити

					ДонНУЕТ.133.ГМБ-23м.2024.ПЗ	Арк.
						27
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

зменшенням вхідного потоку в шнек до меншого, ніж максимум, який він може прийняти самопливом, що призведе до зниження якості вхідної суміші, що висуває підвищені вимоги до рецептури екструдера [12]. Після того, як сировина переміститься в канал гвинта, вона буде рухатися вниз по гвинту за допомогою тертя. Однак не тертя гвинта рухає матеріал вперед, а тертя стовбура. Тангенціальна швидкість на поверхні стовбура визначається за швидкістю обертання шнека:

$$V = \pi DN$$

Компонент швидкості вниз по каналу [7]:

$$V_z = \pi DN \cos \theta$$

$$Q_D = \frac{\pi}{2} \cos \theta \equiv \alpha N$$

Потік опору ефективно прокачує сировину через екструдер пропорційно швидкості обертання екструдера. Постійна пропорційність α залежить тільки від геометрії гвинта. Матеріал неоднорідний і не акуратно укладається в щільну форму. Якщо уявити собі занижену насипну щільність суміші, що надходить в канал шнека, то тертя стовбура знову зменшується до тих пір, поки воно не стане настільки низьким, що тертя буде недостатнім для подолання опору гвинта. Потік припиниться, коли прослизання бочки буде завершено. У той час як секція подачі особливо чутлива до зміни тертя, матеріал просувається вперед за рахунок тертя у всіх частинах екструдера.

2. Секція стиснення (пластифікації). Друга третина гвинта загального призначення, яку також називають перехідною секцією, має глибину каналу, яка зменшується по його довжині до однієї третини глибини подачі. Тоді кажуть, що він має видимий коефіцієнт стиснення 3:1. Ця частина шнека пов'язана з плавленням і видаленням повітря, який виштовхується з бункера. Температури, як правило, встановлюються так, щоб забезпечити готову деформацію матеріалу [12]. Це необхідно тому, що простір уздовж каналу зменшується і, якщо температура буде занадто низькою, матеріал застрягне в гвинті. Більшість таких застрягань тимчасові, але ця зупинка і запуск багато в чому відповідальні за стрибки напруги. Заклинювання відображається на більш високому крутному моменті гвинта, яке можна розглядати, як більш високе навантаження на двигун, яке має бути досить високим, щоб вичавити повітря з вихідної сировини, але не настільки високим, щоб перешкоджати надходженню матеріалу на наступну секцію. Більш низька насипна щільність деяких сумішей також вимагає зміни шнека. Однак, як тільки насипна щільність зменшиться, гвинт 3:1 більше не подаватиме достатньо матеріалу для стабільного заповнення гвинта, і вихід, швидше за все, зросте.

Коли матеріал стискається, він виштовхується вгору до металевого стовбура і утворює готову масу. Легко помітити, що тверді частинки шару речовини, яка виштовхується вгору по відношенню до нагрітого металу,

					ДонНУЕТ.133.ГМБ-23м.2024.ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		28

швидко передають свою енергію суміші, утворюючи розплавлений шар. У міру того, як гвинти стають більшими, теплопередача від кореня гвинта і польотів також передає енергію назовні шару речовини в результаті чого утворюється шар холодного стиснення твердих речовин, який «плаває» в розплавленому матеріалі. Шар речовин тепер ізольований від контакту з металом.

3. Шнекова дозуюча секція. Після того, як сировина розплавляється, вона протікає через дозуючу секцію в розплавленому вигляді. Потік – це комбінація потоку опору стовбура та потоку під тиском. Потік візуалізується випрямленням спірального каналу і бочка розглядається як площина, що рухається по стаціонарному каналу. Ствол перетягує матеріал у бік виштовхування польоту [12]. Оскільки між стволом і гвинтом є лише дуже невеликий зазор, матеріал потім забивається проти штовхаючої сторони польоту через корінь гвинта і назад вгору по задній стороні гвинта. Коли це поєднується з потоком тиску в каналі, відбувається спіральне закручування. Як і в будь-якій трубці (в даному випадку спіральній трубці), самий центральний матеріал рухається вперед швидше, ніж матеріал на зовнішній стороні трубки. Таким чином, комбінація потоку опору та потоку тиску створює дуже обмеженим чином осьове змішування в дозуючій частині.

2.3 Удосконалення одношнекового екструдера

Одношнекова екструзія зазвичай визначається як процес змішування, гомогенізації та формування матеріалу шляхом проштовхування його через спеціально розроблений отвір (матрицю). Одношнековий екструдер поєднує високотемпературний короткочасний процес приготування з кількома іншими операціями пристрою, такими як транспортування, замішування, нагрівання, змішування та формування в одному пристрої. Ця універсальна технологія знаходить все більше застосування в харчовій промисловості, як засіб перетворення відносно невисоких інгредієнтів в проміжні або напівфабрикати.

Надходження енергії в матеріал під час екструзії є важливим параметром, оскільки він пов'язаний з фізичним і хімічним перетворенням у продукт. У типовій операції екструзії двома основними джерелами енергії, які пов'язані зі зміною ентальпії екструдату, є конвекційний теплообмін між гарячою, холодною бочкою та харчовим матеріалом. Швидкість конвекційної теплопередачі пропорційна величині площі контакту між бочкою і текучим матеріалом, тоді як теплота, що виділяється за рахунок в'язкого розсіювання, пропорційна об'єму матеріалу [17]. В одношнековій екструдерній машині переважає в'язке розсіювання механічної енергії, особливо при низькому вмісті вологи, що робить процес екструзії високоенергоєфективним, економічно вигідним. Ця відносно висока ефективність у поєднанні з іншими перевагами, такими як гнучкість і універсальність, є причиною швидкого зростання технології екструзії в харчовій промисловості.

Одношнекова екструдерна машина буває різних форм і розмірів, тому важливо визначити одношнекову екструдерну машину та зіставити її з фізичними характеристиками та цілями змішування. Існує потреба

					ДонНУЕТ.133.ГМБ-23м.2024.ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		29

вдосконалювати та розвивати існуючі механічні та електричні компоненти, такі як сталева рама, гвинти, ствол, регулятор швидкості, бункер, електродвигун, які повинні працювати разом. Однак, є деякі відмінності в одношнековій екструдерній машині, яка призначена для змішування, нагрівання та екструдювання. Одношнекові екструдерні машини мають невеликий бункер і легку конструкцію рами, що приводяться в дію електродвигуном, оскільки рівень удару та напруги на змішування значно менший, ніж у екструдуючій машині. Вкрай важливо глибоко враховувати наступні фактори, такі як тривалість і частота використання на тиждень, вже існуючий ефект, вага матеріалу та довгострокова мета змішування, оскільки вони впливають на придатність типу лабораторної пластикової одношнекової екструдерної машини, яку повинні враховувати.

Одношнековий екструдер складається зі шнека в металевому циліндрі або бочці. Один кінець стовбура прикріплений до горловини подачі, а інший кінець відкритий. Над горловиною подачі розташований бункер, а бочка оточена нагрівальними і охолоджувальними елементами. Сам шнек зчеплений через підшипник і редуктор, або редуктор з приводним двигуном, який обертає шнек в стовбурі. Матриця з'єднана з відкритим кінцем екструдера за допомогою пластини розривника та пакета решіток (або засобу зміни екрану), утворюючи ущільнення між екструдером і матрицею. Під час екструзії частинки сировини подаються з бункера через живильну горловину екструдера в бочку екструдера. Сировина потрапляє на обертовий шнек і транспортується в першій секції або зоні подачі шнека. Упаковані частинки розплавляються при проходженні через середню секцію (перехідну або компресійну зону) шнека, а розплав переміщується в кінцевій секції або зоні дозування. Тиск, що створюється в екструдері, змішує сировину для майбутнього проходження через матрицю [16]. Двигуни приводу екструдера повинні повертати гвинт, мінімізувати коливання швидкості шнека, дозволяти регулювати змінну швидкість (зазвичай від 50 до 150 об/хв) і підтримувати постійний крутний момент. Горловина подачі облягає перші кілька прольотів шнека і зазвичай відокремлена від стовбура екструдера.

Одношнекова екструдерна машина була удосконалена для обертання зі швидкістю 563 об/хв для ефективного змішування та екструдювання.

1. Завантажувальний бункер подає матеріал в екструдер. Одношнекові екструдери зазвичай подаються гравіметрично через стандартні конічні або прямокутні бункери. Незважаючи на те, що в'язка сировина безперебійно надходить у ці бункери, порошки та інші частинки часто вимагають модифікацій для правильної подачі. Спіральний бункер покращує сухий потік, а до бункерів іноді прикріплюють вібраційні колодки або молотки для розбивання містків (засмічень в основі бункера). Вакуумні бункери для подачі зменшують кількість захопленого повітря, яке перешкоджає правильному транспортуванню.

Бункер має радіус основи $r = 19$ мм, верхній радіус $R = 72,5$ мм, $h = 155$ мм і форму усіченого конуса.

Використовуємо рівняння усіченого конуса для розрахунку об'єму бункера.

					ДонНУЕТ.133.ГМБ-23м.2024.ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		30

Об'єм бункера, V_h [17]

$$V_h = \frac{1}{3} \times \pi \times H_h (R_h^2 + r_h^2 + R_h \times r_h)$$

де H_h – висота бункера, 160 мм = 15,5 см;

R_h – радіус верхньої частини бункера, 72,5 мм = 7,25 см;

r_h – радіус основи бункера, 19 мм = 1,9 см;

V_h – об'єм бункера.

$$V_h = \frac{1}{3} \times 3.142 \times 15.5(7.25^2 + 1.9^2 + 7.25 \times 1.9)$$

$$V_h = 1135.506731$$

$$V_h = 1136 \text{ см}^3$$

2. Стволя являє собою металевий циліндр, який оточує гвинт. Один кінець кріпиться до горловини подачі, а протилежний кінець підключається безпосередньо до адаптера матриці. Так як бочки екструдера повинні витримувати тиск вгору до 70 МПа то їх зазвичай виготовляють зі стандартних інструментальних сталей, причому спеціальні інструментальні сталі необхідні для корозійних полімерів. Бочки екструдера зазвичай мають співвідношення довжини до діаметра (L/D) від 24:1 до 36:1, але вони можуть бути більшими. Оскільки плавлення відбувається в більш тривалій перехідній зоні, довші бочки забезпечують підвищену продуктивність. Зазор між стволом і шнеком зазвичай становить від 0,08 до 0,13 мм.

Конструкція для об'єму ствола, V_b [17]:

$$V_b = \pi \times r^2 \times L$$

де r – внутрішній радіус ствола, 35,1 мм = 3,51 см;

L – довжина ствола, 457 мм = 45,7 см.

$$V_b = 3.142 \times (3.51)^2 \times 45.72$$

$$V_b = 1769.8 \text{ см}^3$$

3. Шнеки екструдера встановлюються в бочку і підтримуються підшипником. Довжина хвостовика гвинта входить в зав'язаний підшипник, а довжина польоту контактує з пластиком. У дозуючих гвинтах відведена ділянка ділиться на три зони: подача, перехідна або компресійна і дозування. Зона подачі має постійну глибину каналу, як і зона дозування. Однак глибина каналу в перехідній зоні поступово зменшується. Оскільки розплавлений полімер вимагає меншого обсягу, ніж тверді частинки, глибина каналу зони дозування менша, ніж глибина подачі. Низькі ступені стиснення не дозволяють повністю

					ДонНУЕТ.133.ГМБ-23м.2024.ПЗ	Арк.
						31
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

упакувати тверді частинки, і тому розплав буде містити бульбашки повітря. Навпаки, високі ступені стиснення доставляють занадто багато полімеру в зону дозування, а з поліолефінами створюють проблеми з плавленням в перехідній зоні. Таким чином, типові вимірювальні гвинти мають ступінь стиснення від 1,5:1 до 4,5:1.

Розрахунок обсягу, займаного валом шнека [17]:

$$V = \pi \times r^2 \times L$$

де r – радіус валу гвинта, 19 мм ~ 1,9 см;

L – довжина валу шнека, 457 мм = 45,7 см.

$$V = 3.142 \times 3.61 \times 45.72$$

$$V = 518.58 \text{ cm}^3$$

Розрахунок об'єму, зайнятого гвинтовим польотом:

$$V = \pi \times r \times L$$

де n – кількість ребер гвинта, $n = 7$;

L – довжина 1 ребра гвинта, 20 мм = 2 см, довжина ребра гвинта, $2 \times 3,5 = 7$ см;

r – радіус ребра гвинта, $35 - 19 = 16$ мм = 1,6 см.

$$V = 3.142 \times (1.6)^2 \times 7$$

$$V = 56.3 \text{ cm}^3$$

Розрахунок об'єму, займаного шнеком:

$$V = 518.58 + 56.3$$

$$V = 574.88 \text{ cm}^3$$

Спочатку на стінці стовбура утворюється тонка в'язка плівка харчової сировини. Досягнувши серцевини шнека потік сировини знову піднімається вгору, встановлюючи обертальний рух перед передньою кромкою шнека. Спочатку шнековий політ містить тверді гранули, але вони, як правило, змітаються в розплавлену ванну обертальним рухом. Коли шнек обертається, матеріал проходить далі вздовж стовбура, і все більше і більше твердого матеріалу змітається в розплавлену ванну до тих пір, поки в кінцевому підсумку між польотами шнека не залишиться тільки розплавлений матеріал. У дозуючій зоні екструдера полімер зазвичай розплавлений. Обертовий шнек виштовхує матеріал уздовж стінок нерухомої бочки, створюючи потік опору. Цей потік опору забезпечує рух екструдера вперед, і, за відсутності матриці,

					ДонНУЕТ.133.ГМБ-23м.2024.ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		32

фактично є єдиним присутнім потоком. Додавання матриці обмежує відкритий викид на кінці екструдера та створює великий градієнт тиску вздовж екструдера.

Змішувальні штифти являють собою ряди металевих штифтів, вставлених в діаметр кореня шнека, а шліцьові польоти – це пази, які вирізаються в польотах дозуючої ділянки шнека. Обидва прості та легко адаптовані до існуючих гвинтів, але забезпечують потенційну можливість застою матеріалу та обмеженого ступеня змішування. Крім того, матеріал стікає назад через щільні польоти, що збільшує час перебування та створює можливість для деградації термо- та чутливих до зсуву матеріалів. Деякі розподільні змішувальні елементи ефективно перемішують, але не забезпечують транспортування маси сировини вперед. Ці елементи зазвичай вбудовані в останні три і більше каналів гвинта [19]. Секція змішування містить багато незначних польотів на куті спіралі, який відрізняється від кута первинних польотів. Польоти створюють нові канали, які розділяють потік, який рекомбінується між сегментами секції змішування. На відміну від цього, з секцією змішування потік розділяється та рекомбінується, коли він обтікає шпилькові перешкоди в змішувальному елементі. Оскільки і в шнеку і в бочці присутні порожнини, розплав розділяється і рекомбінується в міру його перенесення з порожнин шнека в порожнини стовбура і назад. Третя група перемішуючих елементів забезпечує як розподільне перемішування, так і пряму передачу. У змішувальній секції дозуюча секція шнека розділена на ділянки, які чергуються з глибоким або неглибоким діаметром кореня. Матеріал перекидається, так як він витісняється з однієї секції в іншу.

Проектування розрахунку геометрії гвинта [17]:

$$\tan\varphi = \frac{p}{\pi D_s}$$

де φ – кут спіралі;

D_s – діаметр гвинта, 70 мм;

p – крок гвинта (p) = 48 мм.

$$\tan\varphi = \frac{48}{219.94}$$

$$\varphi = 12.3 = 12^\circ$$

Розрахунок співвідношення довжина/діаметр (L/D):

$$L/D = \text{Довжина прольоту гвинта} / \text{Зовнішній діаметр гвинта}$$

де L – довжина гвинта, 419,2 мм;

D – зовнішній діаметр гвинта, 70 мм.

$$L/D = \frac{419.2}{70}$$

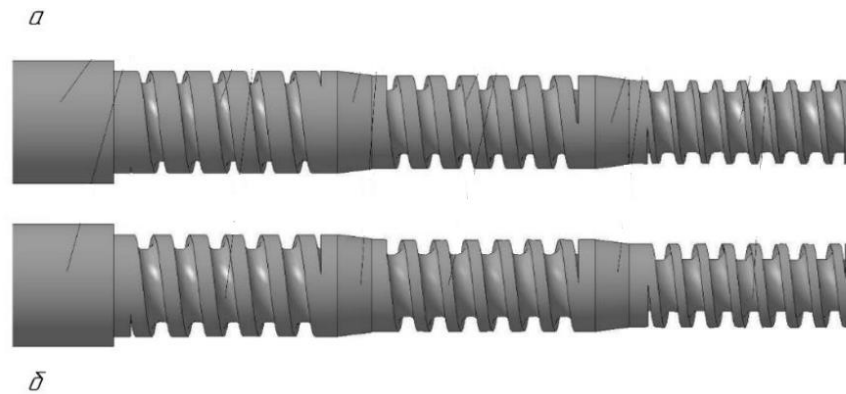
					ДонНУЕТ.133.ГМБ-23м.2024.ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		33

$$L/D = 6:1$$

Запропоновано, для досягнення необхідної глибини фізико-хімічних перетворень внаслідок термомеханічної обробки та отримання сировини більшої кількості різновидів здійснювати екструзію за рахунок інтенсифікації впливу стискаючих зусиль у зазорі між диском та матрицею (рис. 2.2). Пропонується використання збірних шнеків різної конфігурації:

1. Стандартний шнек екструдера з постійним кроком нарізки витків. При цьому глибина нарізки витка на кожному наступному шнековому елементі буде зменшуватися, утворюючи конусний переріз шнека, що розширюється, що сприятиме підвищенню інтенсивності термомеханічної обробки.

2. Шнек зі змінним кроком нарізки заснований на зменшенні кроку нарізки витка шнека. Таким чином, вибираючи конфігурацію шнека, регулюється глибина термомеханічної обробки для виробництва сировини високої якості, виходячи з виду сировини рослинного походження або їх співвідношення в рецептурній суміші.



а – з постійним кроком нарізки витка, б – з кроком нарізки, що зменшується

Рисунок 2.2 – Шнеки екструдера

4. Матриця екструдера виготовлена у вигляді циліндра з отворами та має різні виконання. Різна кількість отворів (4,8 або 16) дозволяє варіювати діаметр кульки готового продукту. Рівномірний розподіл отворів по циліндру матриці та їх однаковий діаметр дозволяють виключити одномоментні перепади тиску в передматричній зоні, тим самим уникнути пригорання екструдата та забивання отворів матриці. Так само можливе виготовлення виробів у вигляді паличок. Варіативність форм і кількість отворів матриці дозволяє розширити асортимент екструдатів, що випускаються на одному екструдері.

Запропоновано для зменшення кількості виробничого обладнання об'єднати складові елементи в один формуючий вузол, що забезпечить легкість обслуговування за рахунок спрощеної конструкції, стабільність та надійність роботи екструдера. Формуючий вузол складається з диска 1, закріпленого на кінці валу та матриці 2, закріпленої на корпусі 4. Динамічний вузол формування сприяє досягненню однорідності температури розплаву за перерізом і виключає додаткову операцію з технологічного процесу.

					ДонНУЕТ.133.ГМБ-23м.2024.ПЗ	Арк.
						34
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Застосовується відповідна конфігурація шнека 3 із відповідним кроком 5 (рис. 2.3).

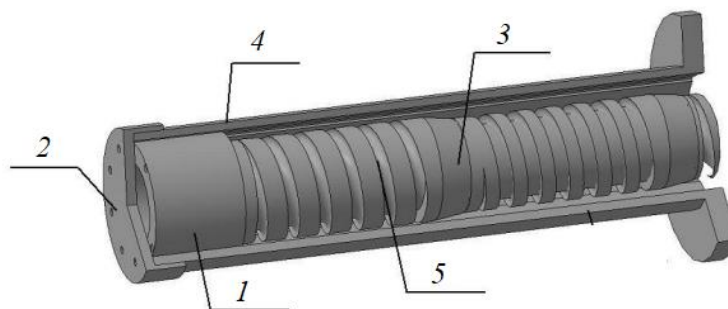


Рисунок 2.3 – Формуючий вузол екструдера

На рисунку 2.3 позначено: 1 – диск закріплений на кінці валу, 2 – матриця, 4 – корпус, 3 – відповідна конфігурація шнека, 5 – крок гвинта.

Матриця кріпиться до зовнішньої поверхні пресуючого корпусу на різьбу. Таким чином, регулюючи глибину закручування матриці, можна регулювати зазор між матрицею і диском, підлаштовуючись під технологічні режими, залежно від властивостей сировини, що переробляється, таких як вологість і крупність фракції, що з одного боку не дозволяє утворити пробки, і, отже, виключити ефект перепалу продукту в зоні між торцем диска і торцем матриці та досягти повної гомогенізації екструдата в результаті ефекту складного зсуву з іншого боку.

Запропонована удосконалена конструкція екструдера з формуючим вузлом дозволяє переробляти розширений асортимент рослинної сировини для виробництва пористих та структурованих екструдатів різних форм та розмірів з високим ступенем засвоюваності, без використання додаткового обладнання для операцій подрібнення готового продукту та зволоження сировини. Використання запропонованої конструкції екструдера дозволить:

- покращити якість екструдату, що отримується, і знизити час його отримання за рахунок досягнення необхідної глибини фізико-хімічних перетворень внаслідок термомеханічної обробки за рахунок інтенсифікації впливу стискаючих зусиль у зазорі між диском та матрицею, використання збірних шнеків різної конфігурації;

- розширити асортимент продукції, що випускається на одному екструдері за рахунок використання матриць з різною кількістю та формою отворів,

- скоротити кількість виробничого обладнання за рахунок використання динамічного формуючого вузла;

- забезпечити легкість обслуговування формуючого вузла за рахунок його спрощеної конструкції, стабільність та надійність роботи екструдера;

- розширити технологічні можливості екструдера за рахунок одночасної переробки рослинної та вторинної сировини харчового призначення при виробництві багатокомпонентних снєків.

На основі вище зазначеного, можна вважати, що екструдери харчових продуктів забезпечують термомеханічний зсув, необхідний для викликання фізико-хімічних змін сировини з інтенсивним перемішуванням для диспергування і гомогенізації. Екструзія – це термічна обробка, яка передбачає застосування високої температури, високого тиску та зсувних сил до сировини, наприклад до зернових продуктів. Час перебування, температура, тиск та зсув характеризують екструзійне приготування харчових матеріалів. Придатність екструдованих харчових продуктів для конкретного застосування залежить від їх функціональних властивостей, таких як водопоглинання, розчинність у воді та індекси поглинання, індекс розширення, насипна щільність та в'язкість.

Зазначено, що важливими параметрами також є швидкість шнека, швидкість подачі та геометрія матриці, які контролюють механічну історію та час перебування матеріалу в екструдері. На якість готової продукції припадає кілька умов екструзійної обробки. Контроль швидкості подачі, швидкості обертання шнека, температури ствола і тиску в стволі разом з вищезазначеними критичними параметрами буде визначати хрусткість, твердість і різні інші характеристики, які будуть впливати на якість продукту. Під час екструзії висока температура і великі сили зсуву викликають розпад структури, а взаємодії між компонентами продукту збільшують вологість, що додатково впливає на реологічну поведінку харчового матеріалу в екструдері за рахунок зменшення навантаження на зсув.

Запропоновано, для досягнення необхідної глибини фізико-хімічних перетворень, внаслідок термомеханічної обробки та отримання сировини більшої кількості різновидів, здійснювати екструзію за рахунок інтенсифікації впливу стискаючих зусиль у зазорі між диском та матрицею. Пропонується використання збірних шнеків різної конфігурації:

1. Стандартний шнек екструдера з постійним кроком нарізки витків. При цьому глибина нарізки витка на кожному наступному шнековому елементі буде зменшуватися, утворюючи конусний переріз шнека, що розширюється, що сприятиме підвищенню інтенсивності термомеханічної обробки.

2. Шнек зі змінним кроком нарізки заснований на зменшенні кроку нарізки витка шнека. Таким чином, вибираючи конфігурацію шнека, регулюється глибина термомеханічної обробки для виробництва сировини високої якості, виходячи з виду сировини рослинного походження або їх співвідношення в рецептурній суміші.

Запропоновано для зменшення кількості виробничого обладнання об'єднати складові елементи екструдера в один формуючий вузол, що забезпечить легкість обслуговування за рахунок спрощеної конструкції, стабільність та надійність роботи екструдера. Формуючий вузол складається з диска, закріпленого на кінці валу, матриці, яка закріплена на корпусі та відповідної конфігурації шнека. Формуючий вузол сприятиме досягненню однорідності температури в'язкої харчової сировини.

					ДонНУЕТ.133.ГМБ-23м.2024.ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		36

РОЗДІЛ 3 АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕНЬ

3.1 Контроль тиску, температури, нагріву та охолодження у процесі екструзії

1. Тиск у стовбурі екструдера. Тиск усередині стовбура екструдера під час процесу екструзії високий. Занадто сильний тиск може розірвати бочку. Для захисту стовбура екструдера від надлишкового тиску розроблено кілька методів. Розривні диски можуть встановлюватися на кінці штампа стовбура. Якщо тиск розплаву перевищує номінальний показник розривного диска, диск виходить з ладу і тиск скидається. В якості попереджувального пристрою також поширений датчик тиску з сигналізацією, який можна налаштувати для оповіщення оператора або для вимкнення екструдера.

2. Регулювання температури стовбура екструдера. Динамічна поведінка екструдера значною мірою визначається системою контролю температури на екструдері. Тому важливо розуміти основні характеристики різних систем контролю температури. Більшість систем управління є системами замкнутого циклу або зі зворотним зв'язком. Вимірюється змінна, що підлягає контролюванню, і ця інформація відправляється на блок управління. З блоку управління сигнал подається на виконавчий механізм, який регулює процес таким чином, щоб керуюча змінна була максимально наближена до потрібного заданого значення [21]. В екструдерах широко використовуються системи управління зі зворотним зв'язком. В основному існує два способи утримання рівня змінної в певних межах: метод включення-виключення і модулюючий або безперервний метод регулювання. Управління включенням-виключенням, мабуть, найпростіший тип автоматичного управління. Терморегулятори регулюють температуру в бочці за допомогою бочкових нагрівачів і охолоджувальних блоків. Екструдери меншого розміру зазвичай мають три або чотири зони нагріву та охолодження. Більші екструдери часто мають шість і більше зон. Кожна зона оснащена датчиками температури і регулятором температури.

3. Нагрівання стовбура екструдера. Для роботи бочку необхідно нагріти. Більшість бочкових нагрівачів є електричними, проте існують і інші типи. Литі нагрівачі являють собою литі алюмінієві роз'ємні циліндри з вбудованими всередину ізолюваними опорними проводами. Найпростішим видом нагрівача є слюдяний стрічковий нагрівач. Слюдяні стрічкові нагрівачі містять опірні дроти з покриттям, які затиснуті між слюдяною ізоляцією зі сталевим корпусом для підтримки. Керамічні нагрівачі використовуються в приміщеннях з високими вимогами до тепла. Як литі алюмінієві, так і слюдяні стрічкові нагрівачі потребують щільного контакту зі стволом, тому періодичні перевірки

					ДонНУЕТ.133.ГМБ-23м.2024.ПЗ			
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата				
Розроб.	Бельговський				Дослідження процесу екструзії та удосконалення шнекового екструдера	Літ.	Арк.	Аркушів
Перевір.	Цвіркун						37	6
Н. Контр.	Омельченко					ДонНУЕТ Кафедра ЗІДО		
Затверд.	Хорольський							

та затягування нагрівачів, коли це необхідно, повинні бути частиною технічного обслуговування. Нагрівачі можуть перегоріти, якщо не зможуть передати своє тепло в бочку.

4. Конструкція та обладнання для охолодження стовбура екструдера. Охолодження бочки також є важливою частиною процесу екструзії. Охолодження бочки екструдера необхідне, якщо сировина занадто нагрівається або якщо екструдер потрібно швидко вимкнути. Бочки можуть охолоджуватися за допомогою повітря або рідини [21]. Бочки з повітряним охолодженням мають піддувальні установки і пленум-камеру під стволом в кожній температурній зоні. Повітродувка включається регулятором температури стовбура при досягненні верхнього заданого значення. Бочки, які охолоджуються рідиною, циркулюють рідину через змійовики, відлиті в блоки нагрівачів, або через окремі змійовики охолодження. Це може бути замкнений контур з повторним використанням тієї ж рідини або розімкнений контур.

Дуже важливо підтримувати температурний контроль над розплавом в процесі екструзії. Охолодження бочки є одним із способів контролю будь-якого перегріву пластику. Однак, якщо екструдер вимагає значної кількості охолодження під час звичайного виробництва, це свідчить про невідповідність між конструкцією шнека та цим конкретним пластиком або проблему з процесом екструзії.

3.2 Моделювання екструзійного навантаження на шнек

Високотемпературна екструзія здійснюється при температурі від 180–200°C (короткочасний процес), який застосовується для виробництва снєків, оскільки забезпечує безперервну та ефективну систему, що забезпечує однорідний кінцевий продукт. Деякі важливі змінні, які впливають на характеристики екструдованого продукту, включають конфігурацію шнека, швидкість шнека, температуру екструзії та суміші, яка подається (тобто інгредієнти і вміст вологи). Сировина, зазвичай, має високий вміст крохмалю через високу водопоглинаючу здатність і пов'язані з нею теплові переходи (желатинізація і ретроградація), які визначають розширення і кінцеву текстуру екструдату.

Найважливішим механічним елементом шнекового екструдера є шнек. Конструкція шнека в основному залежить від сировини, яку потрібно екструдувати, а також від величини тиску, який повинен розвинути шнек. Для досягнення необхідної глибини фізико-хімічних перетворень, внаслідок термомеханічної обробки та покращення отриманої сировини більшої кількості різновидів, здійснювати за рахунок інтенсифікації впливу стискаючих зусиль у зазорі між диском та матрицею, що досягається використанням збірних шнеків різної конфігурації. Як зазначалося раніше, пропонується застосовувати шнек з шириною гребеня витка, що збільшується, постійним кроком і змінною глибиною нарізки витка. При цьому глибина нарізки витка на кожному наступному шнековому елементі буде зменшуватися, утворюючи конусний переріз шнека, що розширюється, що сприятиме підвищенню інтенсивності тепломеханічної обробки. А також змінну конфігурацію, а саме шнек зі зміним

					ДонНУЕТ.133.ГМБ-23м.2024.ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		38

кроком нарізки заснований на зменшенні кроку нарізки витка шнека, що сприяє збільшенню стиснення та викликає значні зсувні деформації в продукті.

Під час дослідження було використано два набори одношнекових екструдерів геометричної конфігурації, які представлені на рисунку 3.1 та 3.2. Для шнекової моделі при робочих навантаженнях повинні бути визначені пружні та пластичні властивості матеріалу. Матеріалом шнека є сталь марки 4140, яка є середньовуглецевим, відносно недорогим матеріалом і його властивості вказані в таблиці 3.1.

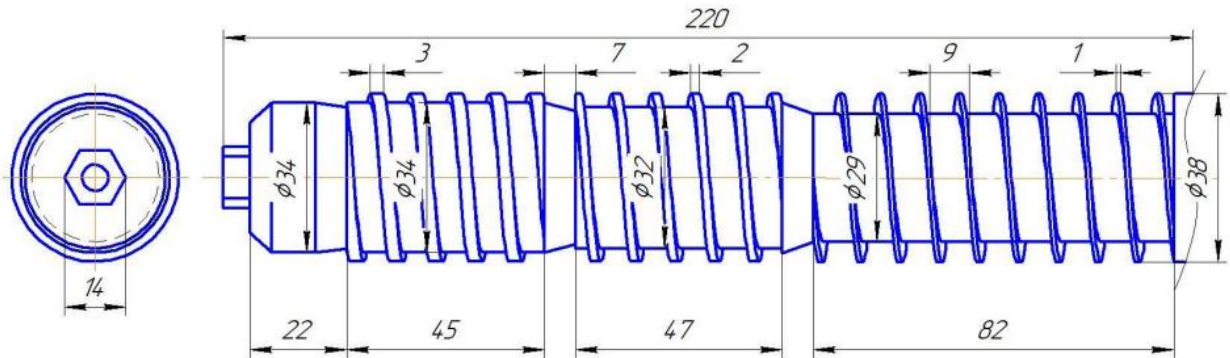


Рисунок 3.1 – Стандартний шнек екструдера з постійним кроком нарізки витка

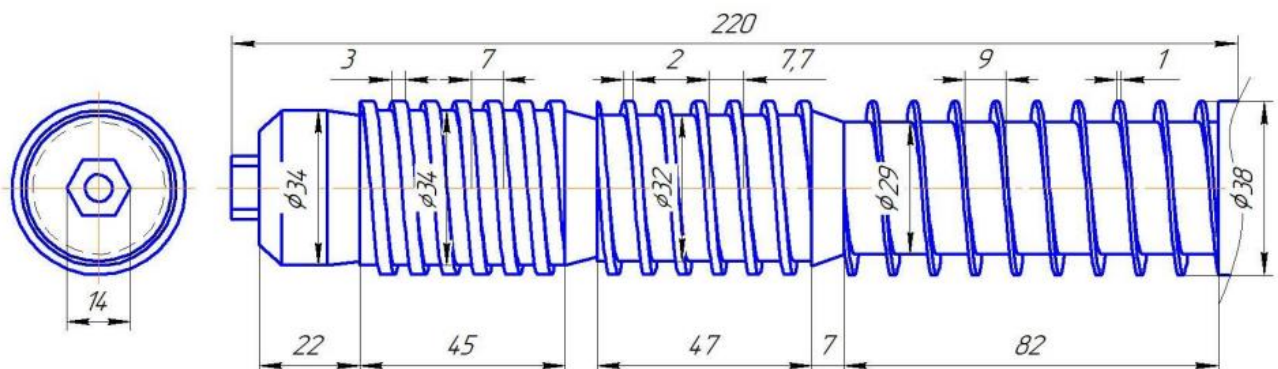


Рисунок 3.2 – Змінний шнек екструдера з кроком нарізки витків, що зменшуються

Таблиця 3.1 – Властивості матеріалу

Власність	Сталь марки 4140
Щільність, кг/мм ³	7850
Коефіцієнт теплового розширення, 1/°C	1,27
Теплопровідність, Вт/м °C	42.5
Модуль пружності, ГПа	200
Межа плинності, МПа	655
Гранична міцність, МПа	1020

Неправильне проектування і підбір шнека для екструдера, який є невід’ємним конструктивним елементом в значній частині промислових

Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

процесів, може означати низькі показники, надмірну потужність, сильний знос шнека і деградацію матеріалу, що транспортується. Коли шнек встановлюється в екструдер, типовий радіальний зазор між шнеком і бочкою становить $0,001 D$, де D – діаметр екструдера. Коли екструдер працює, фактичний зазор між гвинтом і стволом може бути зовсім різним. Є дві основні причини зміни кліренсу в реальних умовах обробки. Однією з причин є температура, а іншою стискаюче навантаження на шнек (екструзійне навантаження). Зміна зазору між шнеком і стволом може призвести до заклинювання шнека, що сприятиме до значного пошкодження екструдера та поломки шнека. Тому у процесі роботи змодельовано екструзійне навантаження на стандартний шнек екструдера з постійним кроком нарізки витків при 185° та екструзійне навантаження на шнек екструдера з кроком нарізки витків, що зменшуються при 185° . У роботі було проведено дослідження одногвинтових моделей гвинтів із використанням програмного забезпечення.

Для кожного шнека розподіл температури поверхні поступово збільшується вздовж напрямку екструзії. Для гвинтів з різною формою перерізу найвища температура гвинта становить 195°C , а найвища температура канавки гвинта становить 156°C , коли форма перерізу гвинта прямокутна – найвища температура шнека становить 197°C , а найвища температура канавки шнека – 157°C , коли форма перетину шнека зигзагоподібна – найвища температура шнека становить 198°C , а найвища температура канавки гвинта – 158°C [18].

Сили, прикладені до шнека екструдера через робочий тиск, розподіл температури та вагу шнека, створюють напруги, які призводять до збільшення ймовірності заклинювання шнека. Високий тиск і температура можуть збільшити пластичність сировини, що в свою чергу дозволяє проводити великі деформації за одну операцію без деформації матеріалу. Коли матеріал пластично деформується, дуже велика частина витраченої роботи виявляється у вигляді теплової енергії [20, 22]. Створювана температура зменшує напругу потоку матеріалу, що, відповідно, зменшує енергію, яка необхідна для деформації. Щоб уникнути занадто високого екструзійного навантаження необхідно дотримуватися точних температурних і швидкісних режимів. Ці умови особливо важливі для досягнення необхідних і однорідних властивостей проходження в'язкої сировини уздовж шнека екструдера.

Екструзійне навантаження гвинта при різних робочих температурах, як для стандартного шнека екструдера з постійним кроком нарізки витка, так і для змінного екструдера з кроком нарізки витків, що зменшуються, може бути проаналізовано і порівняно при однакових умовах. Реологічна поведінка в'язкої харчової сировини у процесі стиснення та формування в основному включає: зсувний потік, липкий потік і гнучкість. При цьому зсувний потік є домінуючою формою матеріального потоку. Основними факторами, що впливають на в'язкість сировини є температура і швидкість зсуву. Важливим є аналіз даних про в'язкість сировини при різних швидкостях зсуву і температурі в різних експериментальних умовах. Екструзійне навантаження показує співвідношення між довжиною гвинта з відповідним зміщенням, що відбулося на кожному гвинті. Для традиційного гвинта на рисунку 3.3 показане

					ДонНУЕТ.133.ГМБ-23м.2024.ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		40

навантаження на стандартний шнек екструдера з постійним кроком нарізки витка при температурі 185°C, а на рисунку 3.4 варіація зміщення по довжині гвинта.

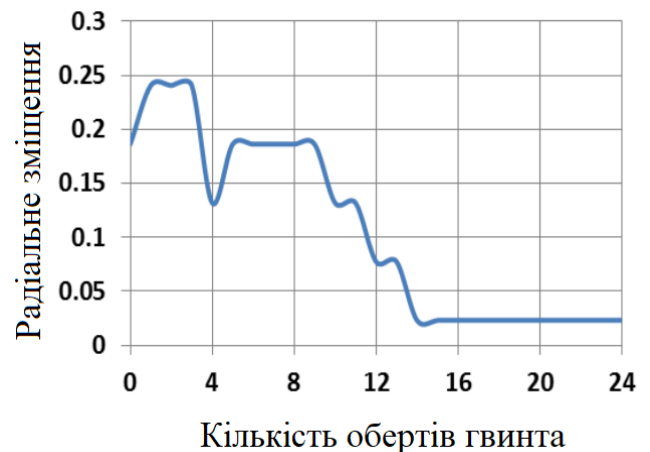
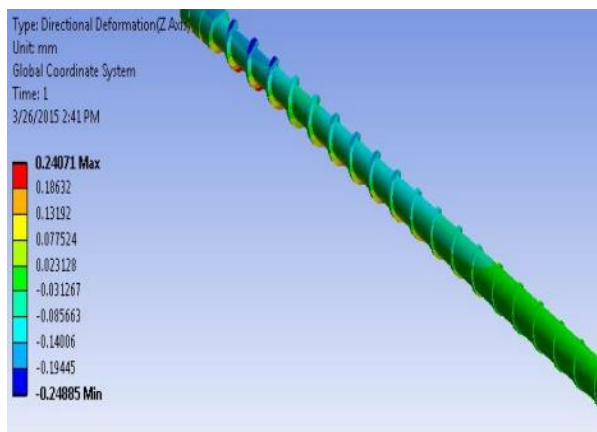


Рисунок 3.3 – Екструзійне навантаження на стандартний шнек екструдера з постійним кроком нарізки витків при 185°

Зміна температури на стандартному шнеку екструдера з постійним кроком нарізки витка особливо не впливає на польоти, що піддаються максимальному навантаженню. У той час як поведінка шнека екструдера з кроком нарізки витків, що зменшуються, має іншу поведінку. Величина максимального екструзійного навантаження збільшується за рахунок підвищення температури ствола (рис. 3.4).

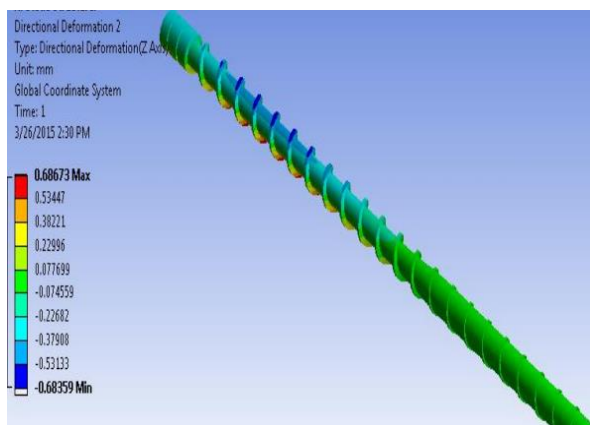


Рисунок 3.4 – Екструзійне навантаження на шнек екструдера з кроком нарізки витків, що зменшуються при 185°

Відповідно, температура та форма шнека впливають на екструзійне навантаження на шнек екструдера:

- більш висока температура шнека призведе до набагато більшого розширення шнека в горловині подачі, що може призвести до заклинювання шнека;
- мінімальне зміщення відбувається на ділянці дозування як для

стандартного шнеку екструдера з постійним кроком нарізки витків так і для шнека екструдера з кроком нарізки витків, що зменшуються;

– гвинт з кроком нарізки витків, що зменшуються, має більше тенденцій до збільшення екструзійного навантаження в порівнянні з традиційним гвинтом;

– підвищення температури у стандартного шнеку екструдера з постійним кроком нарізки витків не призводить до особливого збільшення польотів, що піддаються максимальному екструзійному навантаженню, в той час як підвищення температури шнека екструдера з кроком нарізки витків, що зменшуються, призводить до збільшення максимального екструзійного навантаження;

– тиск на виході із стандартного шнеку екструдера з постійним кроком нарізки витків є мінімальним, а тиск на виході зі шнека екструдера з кроком нарізки витків, що зменшуються, є максимальним;

– гвинт з кроком нарізки витків, що зменшуються, може покращити теплопередачу розплаву;

– швидкість зсуву потоку зі стандартною формою шнека змінюється більш поступово;

– щоб зменшити зміщення гвинта (тобто ймовірність заклинювання гвинта) слід враховувати наступне: охолодження шнека в зоні подачі, зниження температури в перехідній та дозуючій секціях, збільшення зазору в області подачі.

На основі вище зазначеного можна вважати, що високотемпературна екструзія здійснюється при температурі від 180–200°C, це короткочасний процес, який застосовується для виробництва снєків, оскільки він забезпечує безперервну та ефективну систему, яка забезпечує однорідний кінцевий продукт.

Досліджено два шнеки екструдерів, а саме: стандартний шнек екструдера з постійним кроком нарізки витка та шнек екструдера з кроком нарізки витків, що зменшуються. Екструзійне навантаження показує співвідношення між довжиною гвинта з відповідним зміщенням, що відбулося на кожному гвинті. Результати свідчать, що гвинт з кроком нарізки витків, що зменшуються, має більше тенденцій до збільшення екструзійного навантаження у порівнянні з традиційним гвинтом. Підвищення температури у стандартному шнеку екструдера з постійним кроком нарізки витків не призводить до особливого збільшення польотів, що піддаються максимальному екструзійному навантаженню, в той час як підвищення температури шнека екструдера з кроком нарізки витків, що зменшуються, призводить до збільшення максимального екструзійного навантаження. Тиск на виході із стандартного шнеку екструдера з постійним кроком нарізки витків є мінімальним, а тиск на виході зі шнека екструдера з кроком нарізки витків, що зменшуються, є максимальним. Більш висока температура шнека призведе до набагато більшого розширення шнека в горловині подачі, що може призвести до заклинювання шнека. Щоб зменшити зміщення гвинта слід враховувати наступне: охолодження шнека в зоні подачі, зниження температури в перехідній та дозуючій секціях, збільшення зазору в області подачі.

					ДонНУЕТ.133.ГМБ-23м.2024.ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		42

ВИСНОВКИ

Магістерська робота присвячена дослідженню процесу екструзії та удосконалення шнекового екструдера. У роботі зазначено, що екструзія – це виробничий процес, який використовується для надання сировині потрібної форми. Екструзія – це термічна обробка, яка передбачає застосування високої температури, високого тиску та зсувних сил до в'язкої харчової сировини та розглядається як система при якій змішані інгредієнти проходять через невеликі отвори матриці для формування та надання відповідної форми сировині.

У першому розділі здійснено аналітичний огляд обладнання для екструзії харчових продуктів. Зазначено, що гаряча екструзія та холодна екструзія – це два методи, які використовуються для надання форми сировині. Хоча кінцевою метою є досягнення бажаної форми, але відмінності між цими двома процесами можуть бути досить значними. Гаряча екструзія передбачає нагрівання перед потраплянням у матрицю, що дозволяє здійснювати більший контроль над його деформацією. Холодна екструзія, з іншого боку, не вимагає попереднього нагрівання, оскільки сировина залишається непорушною у своїй первісній цілісності, перш ніж потрапити в матрицю, де вона піддається екстремальному тиску. Таким чином, холодна екструзія має тенденцію отримувати міцніші та стабільніші компоненти, ніж гаряча екструзія, через обмежену швидкість деформації. Холодна екструзія краща, оскільки втрати поживних речовин менші завдяки меншій температурі. Технології екструзії мають великий потенціал для використання в харчовій промисловості.

Зазначено, що екструдер – це пристрій, який використовується для надання форми шляхом виштовхування матеріалу з певного типу матриці або отвору. Екструдери можна класифікувати на поршневі, роликові або шнекові екструдери на основі механізму транспортування. Для харчової промисловості найбільш поширеними є шнекові екструдери, які можуть включати одно-, дво- або кілька шнеків, які обертаються в нерухомій бочці. Незалежно від конструкції або типу, принципи роботи екструдерів схожі. Здійснено аналіз екструзійного обладнання, що застосовується в харчовій промисловості.

Другий розділ присвячено удосконаленню обладнання для здійснення процесу екструзії. Вважається, що на процес екструзії впливають такі параметри, як температура, тиск та екструзійне навантаження, а також конструктивні особливості шнека (геометрія шнека). Придатність екструдованих харчових продуктів для конкретного застосування залежить від їх функціональних властивостей, таких як водопоглинання, розчинність у воді та індекси поглинання, індекс розширення, насипна щільність та в'язкість.

Запропоновано, для досягнення необхідної глибини фізико-хімічних перетворень, внаслідок термомеханічної обробки та отримання сировини

					ДонНУЕТ.133.ГМБ-23м.2024.ПЗ		
<i>Зм.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>			
<i>Розроб.</i>	<i>Бельговський</i>				<i>Літ.</i>	<i>Арк.</i>	<i>Аркушів</i>
<i>Перевір.</i>	<i>Цвіркун</i>					43	2
<i>Н. Контр.</i>	<i>Омельченко</i>				ДонНУЕТ Кафедра ЗІДО		
<i>Затверд.</i>	<i>Хорольський</i>						

більшої кількості різновидів, здійснювати екструзію за рахунок інтенсифікації впливу стискаючих зусиль у зазорі між диском та матрицею. Пропонується використання збірних шнеків різної конфігурації:

1. Стандартний шнек екструдера з постійним кроком нарізки витків. При цьому глибина нарізки витка на кожному наступному шнековому елементі буде зменшуватися, утворюючи конусний переріз шнека, що розширюється, що сприятиме підвищенню інтенсивності тепломеханічної обробки.

2. Шнек зі змінним кроком нарізки заснований на зменшенні кроку нарізки витка шнека. Таким чином, вибираючи конфігурацію шнека, регулюється глибина термомеханічної обробки для виробництва сировини високої якості, виходячи з виду сировини рослинного походження або їх співвідношення в рецептурній суміші.

Запропоновано для зменшення кількості виробничого обладнання об'єднати складові елементи екструдера в один формуючий вузол, що забезпечить легкість обслуговування за рахунок спрощеної конструкції, стабільність та надійність роботи екструдера. Формуючий вузол складається з диска, який закріплений на кінці валу, матриці, закріпленої на корпусі та відповідної конфігурації шнека. Формуючий вузол сприятиме досягненню однорідності температури в'язкої харчової сировини.

У третьому розділі змодельовано екструзійне навантаження на стандартний шнек екструдера з постійним кроком нарізки витків при 185° та екструзійне навантаження на шнек екструдера з кроком нарізки витків, що зменшуються, при 185° із використанням програмного забезпечення. Екструзійне навантаження показує співвідношення між довжиною гвинта з відповідним зміщенням, що відбулося на кожному гвинті. Результати свідчать, що гвинт з кроком нарізки витків, що зменшуються, має більшу тенденцію до збільшення екструзійного навантаження у порівнянні з традиційним гвинтом. Також результати свідчать:

– підвищення температури у стандартного шнеку екструдера з постійним кроком нарізки витків не призводить до особливого збільшення польотів, що піддаються максимальному екструзійному навантаженню, в той час як підвищення температури шнека екструдера з кроком нарізки витків, що зменшуються, призводить до збільшення максимального екструзійного навантаження;

– тиск на виході із стандартного шнеку екструдера з постійним кроком нарізки витків є мінімальним, а тиск на виході з шнека екструдера з кроком нарізки витків, що зменшуються, є максимальним;

– більш висока температура шнека призведе до набагато більшого розширення шнека в горловині подачі, що може призвести до заклинювання шнека;

– гвинт з кроком нарізки витків, що зменшуються, може покращити теплопередачу розплаву, а швидкість зсуву потоку зі стандартною формою шнека змінюється більш поступово;

Щоб зменшити зміщення гвинта слід враховувати наступне: охолодження шнека в зоні подачі, зниження температури в перехідній та дозуючій секціях, збільшення зазору в області подачі.

					ДонНУЕТ.133.ГМБ-23м.2024.ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		44

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Extrusion in food processing: an overview. URL: <https://www.thepharmajournal.com/archives/2019>.
2. Extrusion processing of raw food materials and by-products: a review. URL: https://pure.hud.ac.uk/ws/files/13774005/10.1080_10408398.2018.1480007.pdf.
3. Corn puff snacks machine. URL: <http://www.china-foodmachinery.com>.
4. Extruders. URL: <https://www.wenger.com/extruders-dryers/extruders/forming-extruders>.
5. Breakfast cereals. URL: <https://www.buhlergroup.com/global/en/industries>.
6. Гаряча екструзія в харчовій промисловості. Режим доступу: https://pondersjamesiel.blogspot.com/2013/02/blog-post_2936.html.
7. Види екструзії. Режим доступу: https://studwood.net/2093797/tovarovedenie/vidi_ekstruziyi.
8. Застосування процесів екстракції у харчовій промисловості Режим доступу: https://elartu.tntu.edu.ua/bitstream/123456789/12822/2/Conf_2015v1.
9. Екструзія і екструдери. Режим доступу: <https://intmax.com.ua/zastosuvannya/extruders-1.html>.
10. Single-screw extrusion: introduction and troubleshooting. URL: <https://www.hanserpublications.com/SampleChapters>.
11. Extrusion and extruded products: changes in quality attributes as affected by extrusion process parameters. URL: <https://www.researchgate.net/270656312>.
12. Single-screw extrusion: principles. URL: <https://beckassets/readingsample>.
13. Удосконалення екструзійної технології і отримання продуктів поліпшеного складу. Режим доступу: http://www.confcontact.com/2014-nauka-v-informatsionnom-prostranstve/tn11_girka.htm.
14. Мирончук В.Г. Обладнання підприємств переробної та харчової промисловості / В.Г. Мирончук, І.С. Гулий, М.М. Пушанко. Вінниця: Нова книга, 2007. 648 с.
15. Типи екструдерів за кількістю та типом шнеків. Режим доступу: <https://ten24.com.ua/ua/blog/typu-ekstrudero-v-po-kolichestvu-i-tipu-shnekov/>.
16. Fundamentals of extrusion moulding. URL: <https://crescent.education/wp-content/uploads/2019>.
17. The design and construction of a single screw extruder. URL: <https://www.jmest.org/wp-content/uploads/JMESTN42352996.pdf>.
18. The effects of screw aris cross section shapes on the melting process in the melt conveying section of a pvc wood-plastics single-screw extruder. URL: <https://www.researchgate.net/publication/301421278>.
19. Удосконалення конструкції шнека екструдера. Режим доступу: https://journals.uran.ua/vestnikpgtu_tech/article/view/104469.
20. Моделювання процесу екструзії макаронних виробів Режим доступу: https://elartu.tntu.edu.ua/bitstream/lib/21554/2/X_VSNTK_2017v1e
21. Extrusion – pressure, temperature, heating and cooling control. URL: <https://paulsontraining.com/extrusion-pressure-temperature-heating-cooling-control/>.
22. Mechanical design aspects of single screw extruders using finite element analysis. URL: <https://www.researchgate.net/publication/308209544>.

					ДонНУЕТ.133.ГМБ-23м.2024.ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		45