

ДНІПРОВСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ АГРАРНО-ЕКОНОМІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Інженерно-технологічний факультет

Кафедра інжинірингу технічних систем

Пояснювальна записка

до дипломної роботи

освітнього ступеня «Магістр» на тему:

Обґрунтування параметрів технологічного процесу

екструдуювання зернових кормів

Виконав: студент 2 курсу, групи МГАІ-2-22

за спеціальністю 208 «Агроінженерія»

_____ Коба Тарас Сергійович

Керівник: _____ Дудін Володимир Юрійович

Рецензент: _____ Потеруха Борис Тарасович

Дніпро 2023

**ДНІПРОВСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ
АГРАРНО-ЕКОНОМІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**
Інженерно-технологічний факультет

Кафедра інжинірингу технічних систем
Освітній ступінь: «Магістр»
Спеціальність: 208 «Агроінженерія»

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри

ІТС

(назва кафедри)

доцент

(вчене звання)

Дудін В.Ю.

(підпис)

(прізвище, ініціали)

«09» листопада 2023 р.

З А В Д А Н Н Я
НА ДИПЛОМНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ

Кобі Тарасу Сергійовичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи: Обґрунтування параметрів технологічного процесу екструдування зернових кормів

керівник роботи Дудін Володимир Юрійович, к.т.н., доцент

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом вищого навчального закладу від
«09» листопада 2023 року № 3422

2. Строк подання студентом 04.12.2023 р.

3. Вихідні дані до роботи Аналіз стану питання процесів та обладнання для приготування комбикормів, зокрема екструдування. Патентний пошук, аналіз літературних джерел, останніх досліджень з обраної тематики.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) 1. Аналіз стану питання. 2. Теоретичні дослідження шнекового екструдера. 3. Експериментальні дослідження лабораторного зразка екструдера. 4. Охорона праці. 5. Економічна оцінка. Загальні висновки. Бібліографічний список

⋮

5. Перелік демонстраційного матеріалу

1. Мета і задачі досліджень. Аналіз (3 аркуші, А4). 2. Теоретичні дослідження (3 аркуші, А4). 3. Експериментальні дослідження (2 аркуші, А4). 4. Охорона праці (1 аркуш, А4). 5. Економічні показники (1 аркуш, А4). 6. Висновки (1 аркуш, А4)

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
1-5	Дудін В.Ю., доцент		
Нормоконтроль	Івлєв В.В., доцент		

7. Дата видачі завдання: 26.09.2019 р._____.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Аналітичний (оглядовий)	до 17.11.2023 р.	
2	Теоретичний	до 17.11.2023 р.	
3	Експериментальний	до 17.11.2023 р.	
4	Охорона праці	до 17.11.2023 р.	
5	Економічний	до 25.11.2023 р.	
6	Демонстраційна частина	до 04.12.2023 р.	

Студент

(підпис)

Коба Т.С.

(прізвище та ініціали)

Керівник роботи

(підпис)

Дудін В.Ю.

(прізвище та ініціали)

АНОТАЦІЯ

Коба Т.С. Обґрунтування параметрів технологічного процесу екструдювання зернових кормів /Випускна кваліфікаційна робота на здобуття освітнього ступеня «магістр» за спеціальністю 208 «Агроінженерія» (спеціалізація «Механізація тваринництва»). – ДДАЕУ, Дніпро, 2023.

Дипломна робота містить п'ять основних розділів. У вступі дипломної роботи обґрунтовано актуальність теми, сформульовані мета та задачі, приведено методи досліджень. З аналізу стану питання екструдювання зернових кормів встановлено схему машини, яка підлягає удосконаленню. В другому розділі проведено теоретичне моделювання роботи екструдера на основі чого обґрунтовано технологічні, геометричні, кінематичні та силові параметрів. В результаті лабораторних досліджень визначено раціональні співвідношення конструктивно-режимних параметрів розробленого екструдера. Проведено дослідження розробленої конструкції з точки зору охорони праці. В п'ятому розділі виконано економічну оцінку. На завершення сформульовано загальні висновки, складено бібліографічний список та оформлено додатки.

Ключові слова: сипкі корми, екструдер, гвинт, потужність, питома енергоємність, питомі експлуатаційні витрати.

ЗМІСТ

Вступ	7
1 Аналіз стану питання	9
1.1 Сучасні технології виробництва кормів	9
1.2 Дослідження процесу екструдкування та застосування екструзійних технологій	18
1.3 Аналіз та класифікація обладнання для виробництва екструдата	21
1.4 Висновки по розділу	32
2 Теоретичні дослідження шнекового екструдера	33
2.1 Математичне моделювання процесу пресування в екструдері	33
2.2 Теоретичне обґрунтування конструктивних та технологічних параметрів екструдера	44
2.3 Висновки по розділу	53
3 Експериментальні дослідження лабораторного зразка екструдера	54
3.1 Мета і задачі досліджень	54
3.2 Опис експериментальної установки	55
3.3 Результати експериментальних досліджень	57
3.4 Висновки по розділу	62
4 Охорона праці	64
4.1 Загальні вимоги	64

4.2 Розробка проекту інструкції з охорони праці при роботі з екструдером зернових кормів	65
4.3 Порядок дій у надзвичайних ситуаціях	67
4.4 Висновки по розділу	68
5 Економічна оцінка	69
Загальні висновки	73
Бібліографічний список	75
Додатки	

ВСТУП

Кормовиробництво – провідна багатофункціональна та сполучна галузь сільського господарства, яка є ключовим фактором успіху тваринництва та надає істотний вплив на розвиток рослинництва та збереження цінних сільськогосподарських угідь, що є основою продовольчої безпеки країни.

Аналіз стану галузей АПК останніх років показує, що низька продуктивність кормових угідь, особливо у несприятливі за умовою зволоження роки, не дозволяє в достатній кількості забезпечити наявне поголів'я сільськогосподарських тварин повноцінними кормами. Для досягнення поставленої мети необхідно впровадження нового обладнання та техніки, що дозволяють зберігати корисні компоненти сировини, використовується для приготування комбікорму.

Для нормального функціонування організму великої рогатої худоби (ВРХ) та забезпечення цих тварин необхідною енергією, дуже важливо вносити до кормів зернові культури. Серед корисних для ВРХ зернових культур можна виділити ячмінь, пшеницю та овес. Неналежні умови заготівлі, а також зберігання призводять до пліснявіння корму та утворення в ньому мікотоксинів.

Для ефективного виробництва продуктів тваринництва необхідно раціональне використання кормів, яке включає в себе методи підвищення їх біологічної та поживної цінності. Одним з перспективних методів підготовки кормів до згодовування є екструзія. Виробництво екструдованих кормів з рослинної сировини є однією з найсучасніших технологій отримання високоякісних цінних кормів. Завдяки здійсненню змішування рослинних компонентів та певної технології забезпечується відносно отримання високоякісної продукції.

Для того щоб забезпечити наявність своєї кормової бази у регіонах необхідно використання інтенсивних технологій виробництва продукції тваринництва та рослинництва, тому що на корми відводиться приблизно сімдесят відсотків витрат у тваринництві, що визначають вартість продукції. Екструзування сировинної маси дозволяє отримувати повноцінні збалансовані за поживними та корисними речовинами кормові суміші, мають тривалий термін зберігання

(понад півроку) без зниження основних якостей. Збалансованість екструдованого корму та його висока поживність забезпечують суттєве підвищення продуктивності сільськогосподарських тварин та птиці.

Мета підвищити продуктивність одношнекового екструдера, ефективність приготування комбікорму, зменшення витрат на його виробництво є актуальним завданням, що залежить від конструктивних параметрів екструдера, зокрема конструкції робочого органу - шнека.

Мета дослідження - підвищення ефективності екструдера при переробці зернового матеріалу.

Для досягнення поставленої мети у роботі ставляться такі завдання досліджень:

1. Визначити напрямок удосконалення одношнекового екструдера.
2. Обґрунтувати оптимальні параметри роботи одношнекового екструдера.
3. Провести експериментальні дослідження удосконаленого екструдера.
4. Привести заходи з охорони праці при роботі з екструдером.
5. Дати економічну оцінку ефективності проведених наукових досліджень.

Об'єкт досліджень – технологічний процес роботи одношнекового екструдера.

Предмет дослідження – закономірності процесу екструдювання.

Методи досліджень. Теоретичною основою досліджень служили класичні праці вітчизняних та зарубіжних вчених з проблеми удосконалення процесу екструдювання зерна пшениці. Достовірність теоретичних досліджень підтверджено результатами експериментальних досліджень.

1 Аналіз стану питання

1.1 Сучасні технології виробництва кормів

Продуктивність сільськогосподарських тварин знаходиться в основній залежності від стану в господарстві кормової бази, а саме від здатності забезпечити тварин кормами з урахуванням їхнього віку та продуктивності. Будучи основним джерелом продуктивності тварин, корми грають важливу, вирішальну роль і значною мірою характеризують ефективність виробничої галузі, оскільки понад 50% витрат лягає саме на годівлю.

Переробка кормового продукту на тваринницьку продукцію є одним із основних процесів сільськогосподарського виробництва. Ефективність цього процесу визначається, перш за все, на основі відповідності потребам тварин за вмістом поживних речовин та за своїми фізико-механічними властивостями, від цього підвищиться ефективність сільськогосподарського виробництва. В основу організації раціонального годівлі тварин, входить збалансованість кормів за поживними речовин та мікроелементів, та інших речовин, які сприяють зміцненню стану здоров'я тварин та підвищенню якості кінцевої продукції.

Важливою умовою підвищення продуктивності праці та зниження собівартості тваринницької продукції, що є механізованим виробництво кормів на основі раціональної технології у поєднанні з передовими способами утримання сільськогосподарських тварин. Механізоване виробництво кормів значною мірою розширює їх асортименти для різних видів худоби. Застосування обладнання для переробки рослинного матеріалу та згодовування його сільськогосподарським тваринам та птиці, що дозволяє широко використовувати рослинні матеріали, особливо при їх відгодівлі. На рис. 1.1 представлені поширені технологічні схеми приготування кормів.

З структури кормового балансу, що склалася, віддається перевага, таким

основним типам годівлі, як:

- для молочної великої рогатої худоби - зі збільшенням частки концентрованих кормів до 30-35% у структурі раціону, що використовують силосно – коренеплідний та силосно – сінажний;

- для молодняка великої рогатої худоби на відгодівлі - силосна і жомова, а також концентратнотрав'яна у вигляді повнораційних гранул і брикетів;

- для свиней – концентратно-коренеплідний та концентратно-картопляний, із вмістом концентрованих кормів у раціонах до 65- 75% та концентратний - на великих свинофермах;

- овець - сіно-силосно-концентратний із вмістом концентратів 25-35%, з переважним згодовуванням сіно-концентратної частини раціону у вигляді гранул;

- птиці - концентратний, в основному гранульованими комбікормами.

Виходячи з існуючих наукових досліджень та за даними багатьох виробничих дослідів, показують, що великої рогатої худоби найбільше ефективно згодовувати всі компоненти раціону як кормову суміш.

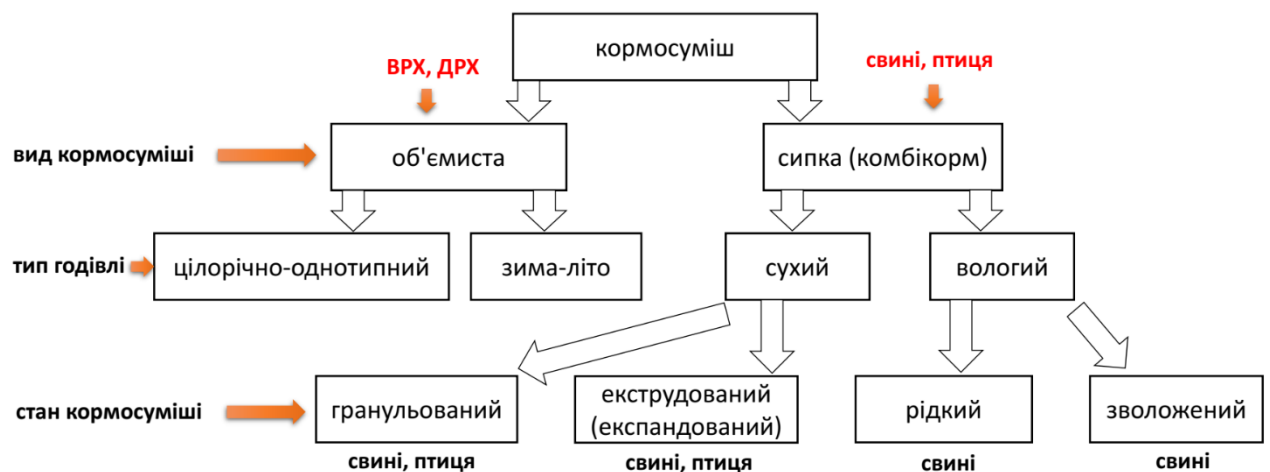


Рисунок 1.1 – Класифікація кормосумішей

На підставі наукових досліджень, отриманих під час експериментів та

досвіду багатьох господарств, встановлено, що приблизно на 5-15% підвищується ефективність використання всіх видів кормів раціону. Про це свідчать дані підвищення продуктивності: на 58% молочних корів та на 10-15% молодняку, які перебувають на відгодівлі. У кормових сумішах можна згодовувати у 1,5-2 рази більше малоцінних грубих кормів, ніж при роздільній роздачі кормів, оскільки тварини неспроможні вибирати корм. У ряді зарубіжних країн, ущільнені в гранули та повнораціонні кормові суміші широко застосовують на відгодівлі великої рогатої худоби. Обробка кормів значно розширює можливості використання різних кормових сумішей із застосуванням як компоненти малоцінних грубих кормів та відходів сільськогосподарського виробництва, підприємств харчової промисловості, технічних та інших виробництв.

Розрізняють такі способи приготування кормів: механічні, теплові, хімічні, біологічні та термічні.

Механічний спосіб обробки кормів є найбільш важливим, без якого жоден із наступних способів не можливий. До механічних способів приготування кормів відносяться: різання, дроблення, миття, розколювання, дозування, просіювання, стирання, очищення, плющення, розминання, змішування, пресування, брикетування, гранулювання та інші. Даний спосіб застосовується як на дрібних, так і на великих комплексах та на комбикормових заводах.

До теплових способів відносять: підсмажування, випікання, заварювання, сушіння, запарювання, випарювання, пастеризація для всіх видів кормів.

Хімічний спосіб частіше застосовують при використанні у годівлі соломи. Перший спосіб обробки корму, це обробка лугом. Для цього солому заливають 1,5-2% розчином луку на 6-12 годин, та після чого її промивають водою. Шляхом обробки соломи меншими дозами луку з пропарювання, можна досягти особливого ефекту. Щоб підвищити поживність соломи, застосовують спосіб - вапнування.

Застосовують інші методи хімічної обробки, наприклад, грубий корм обробляють аміачною водою (з розрахунку 12 літрів 25%-ного розчину на 1 центнер). Даний спосіб обробки дозволяє покращити умови життєдіяльності бактерій, що розкладають непережарвану клітковину та що підвищують її поживну цінність.

Способи термічної обробки кормових матеріалів представлені в таблиці 1.1. До новітніх прийомів переробки зерна, зерно відходів, відходів полеводства, відходів борошномельної промисловості, біологічних відходів відносять екструзію - один з найбільш ефективних і застосовуваних комбікормової промисловості способів обробки зерна. При обробці зернофуражу в такий спосіб протікають два безперервні процеси: 1) механічне та хімічне деформування; 2) вибух продукту.

Таблиця 1.1 - Термічна обробка комових матеріалів

Способи термічною обробки	Принцип дії	Кормова сировина	Цілі та переваги	Можливі недоліки
Гранулювання	Кондиціонування за допомогою пари, ущільнення в пресі, охолодження та сушіння; фізичні умови, які впливають на корм у пресі: з $80^{\circ}\text{C} > 10$ секунд, тиск навколишнього середовища.	Комбікорм, насамперед всього для телят, поросят, бройлерів, риби	Зниження кількості хвороботворних бактерій, покращення продуктивності, менше втрат корму.	Втрати вітамінів, споживання енергії вище норми
Експандування	Пропускання корму за допомогою шнека через циліндр, що витримує високий тиск під час подачі	Зернові, бобові, комбікорм	Відкриття крохмалю, але тільки не-	Пошкодження протеїнів, руй-

	водяного пара; кондиціювання під тиском; фізичні умови: 100-130°C, 5-10 секунд.	для поросят, птахів, білкові корми для жуйних.	значне покращення перетравності, зниження бактеріального забруднення	нування вітамінів.
Екструдкування	Пропуск корму через циліндр, витримує високий тиск з одним або двома шнеками під тиском та паром; фізичні умови, що впливають на корм: 130-160°C, 5-10 секунд	Корма для котів/собак, риби, поросят, білкові корми для ВРХ.	Відкриття крохмалю та значне поліпшення перетравності, зниження бактеріального забруднення.	Пошкодження протеїнів
Мікронізація	Раптове нагрівання (100-120°C) інфрачервоної печі протягом 20-40 секунд	Зернові, комбікорми	Спукування зерна з заключним плющенням, висушуванням, зміна структури крохмалю, підвищення перетравлюваності	Пошкодження Протеїну

В даний час різними екструзійними методами виробляють кондитерські вироби, а також корми для свійської птиці, тварин, риб. Екструзійне оброблення сільськогосподарської сировини за останні роки набула широкого поширення. У процесі екструдкування зерна відбуваються глибокі зміни у структурі поживних речовин, що підвищує його енергетичну цінність та смакові якості корму:

- підвищується перетравність білків і доступність амінокислот внаслідок руйнування вторинних зв'язків у молекулах білка;
- підвищується перетравність клітковини внаслідок стирання та дроблення її у процесі екструзії;
- крохмаль желатинізується та підвищується його засвоюваність;
- завдяки короткочасності процесу більшою мірою зберігаються амінокислоти і вітаміни, що містяться в злаках;
- підвищується енергетична цінність корму внаслідок розриву стінок жирових клітин, зростає стабільність жирів;
- знищується патогенна мікрофлора;
- покращуються смакові якості готового продукту внаслідок розпаду крохмалю на прості цукри, утворення ароматичних речовин, усунення специфічного запаху, характерного для деяких культур, формування однорідної пористої структури продукту, більш доступного для впливу ферментів у травній системі тварин.

Внаслідок інтенсивної обробки в екструдері змінюється вуглеводний склад зернових культур – в екструдаті у 1,6-3,2 рази знижується вміст крохмалю, в 1,5-6,2 рази збільшується вміст декстринів, в 1,2-2,1 раза збільшується вміст цукрів, таблиця 1.2.

Таблиця 1.2 – Вміст поживних речовин у зернових екструдатах

Вид продукту	Вміст корисних речовин, %		
	цукор	крохмаль	декстрин
Пшениця натуральна	5,3	46,5	4,9
Екструдат пшениці	10,9	18,2	21,9
Ячмінь натуральний	5,6	50,5	6,4
Екструдат ячменю	9,6	11,8	39,9

Екструдати зернових культур характеризуються високим вмістом обмінної енергії, сирого протеїну та жиру.

Екструдат ячменю характеризується високими смаковими якостями та гарною перетравністю поживних речовин. В 1 кг екструдату з ячменю міститься 1,24 кормових одиниць, 13,6 МДж обмінної енергії, 114 г сирого протеїну, 23 г сирого жиру, 4,2 г лізину.

Екструдат пшениці – високоцінний енергетичний компонент кормів з низьким вмістом клітковини, що перевищує кукурудзу за змістом 18 протеїну. В 1 кг екструдату з пшениці міститься 1,35 кормових одиниць, 14,2 МДж обмінної енергії, 127 г сирого протеїну, 30 г сирого жиру, 4,7 г лізину.

При згодовуванні зернових екструдатів сільськогосподарським тваринам спостерігається ряд переваг:

висока засвоюваність – дозволяє вводити до раціону тварини 10-25% звичайної порції (тобто корму потрібно менше);

стерильність - це якість особливо цінна при відгодівлі на ранніх стадіях розвитку; відмінні абсорбуючі властивості - під час годування нейтралізують різні кишкові інфекції та подразнення;

особливі смакові якості - є стимулятором вживання тваринами при підмішуванні кормів нижчої споживчої якості;

отримання високих приростів - скорочується час утримання тварин на відгодівлі, рисунок 1.2.

Зерновий екструдат на виході з екструдера є продуктом у вигляді частинок у формі джгута (стренгу) жовтого кольору довжиною 30-35 мм і шириною 10-12 мм, що має спучену пористу структуру, рисунок 1.3.

Здатність продукту в процесі екструзії втрачати до 50% первісної вологості створює можливість включення до складу комбикорми зелених кормових трав без їх попереднього сушіння. У рецептурі зерно рослинних екструдатів 70-

90% складають зернові компоненти та 10-30% – подрібнена до розміру не більше 10 мм рослинна маса бобових та злакових трав.

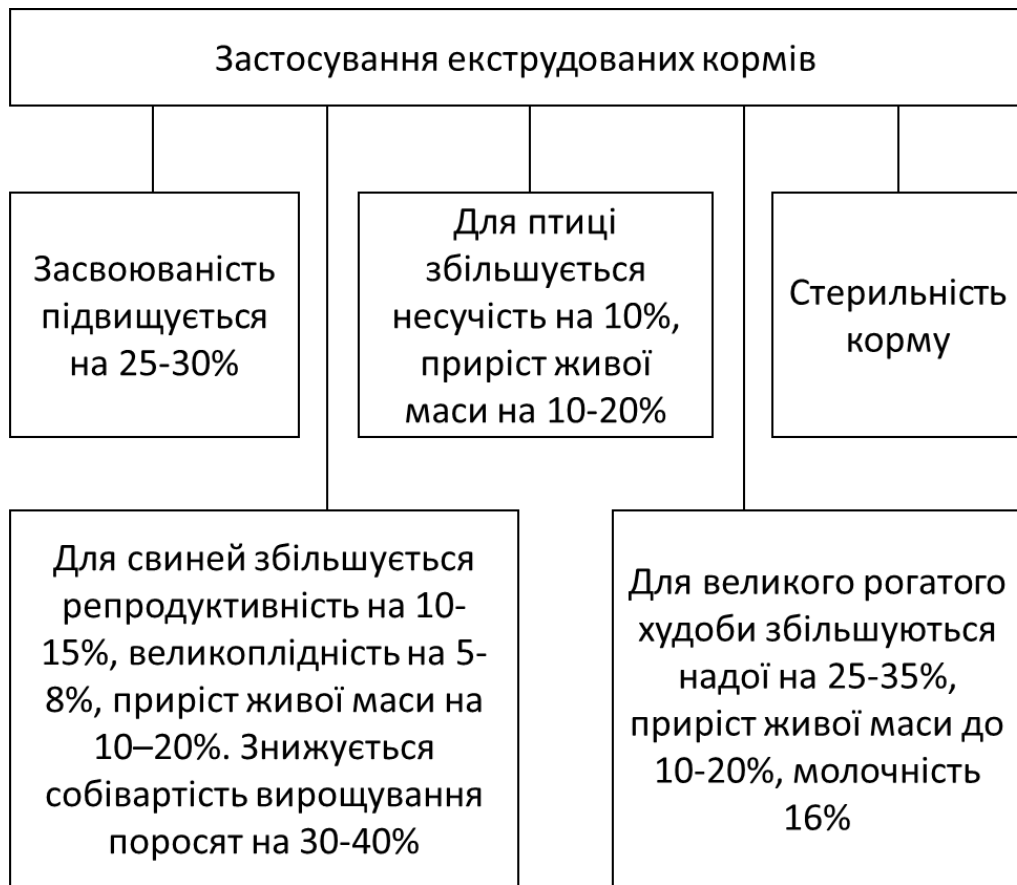


Рисунок 1.2 – Ефективність застосування екструдованих кормів у тваринництві та птахівництві



Рисунок 1.3 – Екструдат зерна пшениці: а – при вологості 18%; б – при вологості 22%; в – при вологості 26%

В 1 кг такого корму міститься (у перерахунку на суху речовину): 10,42-10,46 МДж обмінної енергії, 140-148 грам сирого протеїну, 40,0-41,0 г сиріої клітковини і 20-32 мг каротину. Кінцева вологість готового зерно-рослинного екструдату – 9,8-15,1%, що не вимагає додаткових витрат за досушування продукту.

На підставі огляду способів виробництва кормів було виявлено перевага концентрованих кормів перед іншими через можливість їх глибокої переробки. Концентровані корми – це хліб для сільськогосподарських тварин та незамінна частина раціонів. При його використанні без збільшення обсягу добової дачі можна значно підвищити поживність раціону. Залежно від вмісту протеїну та вуглеводів концентровані корми ділять на дві групи: вуглеводні (60-70%) крохмалю – ячменю, жита, зерно, пшениці, вівса, кукурудзи та ін.) та високопротеїнові (20-45% протеїну - горох, соя, віка, боби, макухи, шроти).

Слід зазначити, що зерно, незважаючи на свої позитивні та негативні особливості, слід вважати не кормом, а цінним компонентом його приготування. Перед згодовуванням концентровані корми піддаються подрібненню, завдяки цьому руйнується оболонка зерна та підвищується загальна поверхня частинок корму. За рахунок цього покращується травний процес тварин.

Розвиток екструзійної техніки дозволило запропонувати нові способи переробки кормових матеріалів для звірогосподарств, свинарства та птахівництва. В основі пропонованих технологій лежить спосіб екструзії, при якому нагрівання екструдованого матеріалу відбувається за рахунок тертя як внутрішнього, так і об стовбур екструдера. У сучасних екструдерах, залежно від характеру оброблюваного матеріалу температура може досягати 200° С, а тиск - 4-5 МПа. Водночас негативні ефекти обробки зводяться до мінімуму завдяки її короткочасності. Матеріал, що обробляється, знаходиться в екструдері не більше 30-90 секунд.

За час проходження через екструдер, суміш:

- стерилізується та знезаражується (хвороботворні мікроорганізми, грибки, пліснява повністю знищуються);
- збільшується в об'ємі (внаслідок розриву молекулярних ланцюжків крохмалю та стінок клітин при виході з екструдера);
- гомогенізується (процеси подрібнення та перемішування сировини в стовбурі екструдера продовжуються, продукт стає повністю однорідним);
- стабілізується (нейтралізується дія ферментів, що викликають прогорання продукту, таких, як ліпаза та ліпоксигеназа, інактивуються антипоживні фактори, токсини);
- зневоднюється (знижується вологість від вихідної).

Екструдкування – енергоємний процес. Вплив множинних факторів на якість екструдата є складною, але дуже важливе практичне завдання, оскільки її рішення вказує шляхи управління процесом, що протікає. Це може бути досягнуто шляхом вдосконалення конструктивних параметрів екструдера, тому підвищення ефективності процесу екструдкування є актуальною завданням.

1.2 Дослідження процесу екструдкування та застосування екструзійних технологій

Термін «екструзія» вперше був використаний для опису процесу отримання виробів із пластмас та гумових сумішей в екструдері машині, призначеної для розм'якшення матеріалів та надання їм певної форми. Перші екструдери створені в ХІХ ст., у Великобританії, Німеччині, США. На початку ХХ ст. було освоєно серійне виробництво екструдерів.

Історично першим, з'явилося холодне екструдкування з температурою продукту на виході екструдера до 60°C. При холодній екструзії відбуваються механічні зміни у матеріалі внаслідок повільного його переміщення під тиском

та формування цього продукту з освітою заданих форм. Екструдований матеріал має підвищену пластичність та низьку в'язкість. Масова частка вологи в сировині становить від 30 до 60%. Температура продукту у процесі холодної екструзії впливає на його властивості незначно і складає на виході з екструдера від 20 до 60 ° С при тиску до 6 МПа. При холодній екструзії часто застосовують примусове охолодження пресуючого механізму, а при теплій і гарячій, навпаки, примусове підведення тепла до матеріалу, що переробляється ззовні застосовують в основному для прискорення виходу екструдера на встановлений технологічний режим.

Поряд із холодною екструзією існує «тепла» екструзія. При теплій та варильній екструзії вихідна сировина має вологість 20-30%. Температура продукту на виході з екструдера становить від 70 до 100°С, тиск екструдування також зростає і стає рівним 8-14 МПа. Високі тиск і температура призводять не тільки до механічного, а й до хімічного перетворення продукту. Екструдат, що отримується, відрізняється невеликою щільністю, незначним збільшенням об'єму, пластичністю, а також пористою будовою.

Одним із перспективних напрямів в екструзійній технології стало створення технології «гарячого» екструдування. При гарячій екструзії сухі інгредієнти сировини змішують з певною кількістю води та подають в екструдер, де поряд з механічним впливом їх піддають тепловій обробці зовнішніми обігрівачами трьох типів: електричними, рідинним чи паровими. Одержуваний продукт (екструдат) відрізняється зниженою щільністю, пористою будовою, йому необхідно додаткова обробка: висушування, обсмажування, випікання тощо.

Масова частка вологи в матеріалі, що екструдується, становить 10-20%. Температура продукту на виході з екструдера в межах від 110 до 200°С, тиск 12-25 МПа. Екструдат на виході з фільтри спучується із значним збільшенням обсягу за рахунок різкого скидання внутрішнього тиску, що веде до вибухового

випаровування вологи впресовуваного екструдата та утворення пористої структури. Гаряче екструдкування порівняно новий технологічний процес обробки харчових та кормових продуктів. Його застосування дозволяє розширити асортимент та здешевити виробництво корму для худоби продуктів швидкого приготування, дитячого харчування. В даний час термопластична екструзія на основі сировини рослинного походження широко застосовується в макаронній, кондитерській, хлібопекарській, крохмалопатковій, а також у комбікормових галузях промисловості.

На основі сировини рослинного походження за допомогою термопластичної екструзії випускається широкий спектр кормів та продуктів харчування. Екструзійні продукти за структурою поділяються на макро- та мікроструктурні. Екструдати пористої та волокнистої макроструктури характеризуються анізотропною мікроструктурою. Якщо відсутня переважна орієнтація в екструдатах з однорідною макроструктурою, такі продукти мають ізотропну мікроструктуру.

Основними компонентами екструзійних продуктів є білки та крохмалі. Екструдати з однорідною та пористою макроструктурою, як правило, містять 80% крохмалів і 10-15% білків, а екструзійні продукти з волокнистою макроструктурою містять 80% білків та 10-15% крохмалю. Екструдовані продукти харчування, що містять переважно крохмаль, можуть мати ізотропну та анізотропну мікроструктуру, а продукти, основним компонентом яких є білки, що характеризуються анізотропною мікроструктурою і частіше використовуються як корми.

Істотну роль процесі термопластичної екструзії грає вода, вміст її в сировині, що екструдується зазвичай не перевищує 40%. Така кількість води відповідає завершенню гідратації більшості біомакромолекул, навіть невеликі добавки води до сухих препаратів біополімерів призводять до зниження температури їх переходу у в'язко - плинний стан, нижчий за температуру їх розкладання, що робить можливим проведення процесу екструзії.

Основами процесів екструзії займаються великі наукові центри. Технічний університет Берліна (Німеччина), Центр досліджень сільськогосподарських проблем у Нанті (Франція), Канзаський університет (Сполучені Штати Америки). Крім розвинених наукових центрів з усього світу ведуться численні наукові роботи, що дозволяють застосувати екструзійний технологічний процес при переробці різних кормових матеріалів.

1.3 Аналіз та класифікація обладнання для виробництва екструдата

До сучасних технологій переробки зерна, зерновідходів, відходів борошномельної промисловості, біологічних відходів відносяться екструзійні технології. У найбільш економічно розвинених державах (США, Японія, країни Західної Європи) екструзійні технології стали пріоритетним напрямком розвитку під час переробки кормів.

Екструзія – це по-справжньому інноваційний метод виробництва кормів для сільськогосподарських тварин. Для найбільш ефективного виробництва продуктів тваринництва необхідно раціональне використання кормів, яке включає в себе методи підвищення їх біологічної та поживної цінності. Використання даної технології дозволить заощадити та швидко отримати максимальний прибуток тваринницького комплексу.

На сьогоднішній день у світі екструзійних технологій знайшли широке застосування два типи екструдерів - одношнекові та двошнекові, які мають різні технічні особливості та специфічні робочі параметри режимів переробки сировини. Одношнекові екструдери призначені для переробки крохмалевмісної сировини, а також рослинної сировини, що містить білки і мають як переваги, так і недоліки. Існує можливість відновлення зношеного робочого органу, за рахунок простоти у виготовленні і щодо низької ціни, проте при цьому погано поєднується оброблюваний продукт, відсутні примусове транспортування та

самоочищення, а також утруднений перехід із однієї сировини на іншу.

Відновлення шнека забезпечується за рахунок того, що в одношнековому екструдер знос шнека концентрується по зовнішній кромці до торця його витків. Одношнекові пресуючі механізми відрізняються простотою конструкції та більшою технологічністю у виготовленні в порівнянні з двошнековими. Двошнековий екструдер більш схильний до зносу. Зношуються шнеки у місцях завантаження та вивантаження продукту. Виходячи з цього, властивості кінцевого продукту та ефективність процесу екструдювання великою мірою залежить від зносу робочих органів. У двошнековому екструдері зони пластифікації та підвищення тиску відокремлені один від одного, що дозволяє незалежно здійснювати пластифікацію та екструдювання продукту. Хоча відомо, що витрати, пов'язані з придбанням одношнекових екструдерів, нижче порівняно із витратами на придбання двошнекових машин.

Найбільша перевага при виробництві екструдованих кормових продуктів віддається одношнековим прес-екструдерам. Одношнековий прес – екструдер містить: завантажувальну камеру для перероблюваного матеріалу і циліндричний корпус, всередині якого екструзійній камері розташовується шнековий робочий орган встановлюється з мінімальним зазором між ним та корпусом. У торці корпусу розташовується головка (матриця) з фільєрою – формуючим отвором. Шнекову камеру найчастіше ділять на дві – три зони: 1 – зона завантаження; 2 – зона плавлення (пластифікації); 3 – дозуюча зона, рисунок 1.4.

У зоні завантаження, екструдований рослинний матеріал, зазвичай сипучому стані через завантажувальну камеру надходить в екструзійну зону і захоплюється витками шнека. Частинки матеріалу переміщуються в осьовому напрямку по гвинтовому каналу шнека, додатково перемішуючи і подрібнюючись. Довжина зони живлення (змішування) становить $(2...10) D$.

Витрата матеріалу в цій зоні залежить від діаметра шнека, глибини його

нарізки та кроку різьблення, підвищуючись при їх збільшенні. У ході переміщення під дією тиску (2-5 МПа), створюваного шнеком, поступово збільшується тиск кормового матеріалу, а під дією тертя матеріалу об витки шнека – його температура, внаслідок чого починається процес плавлення (зона ущільнення та плавлення матеріалу).

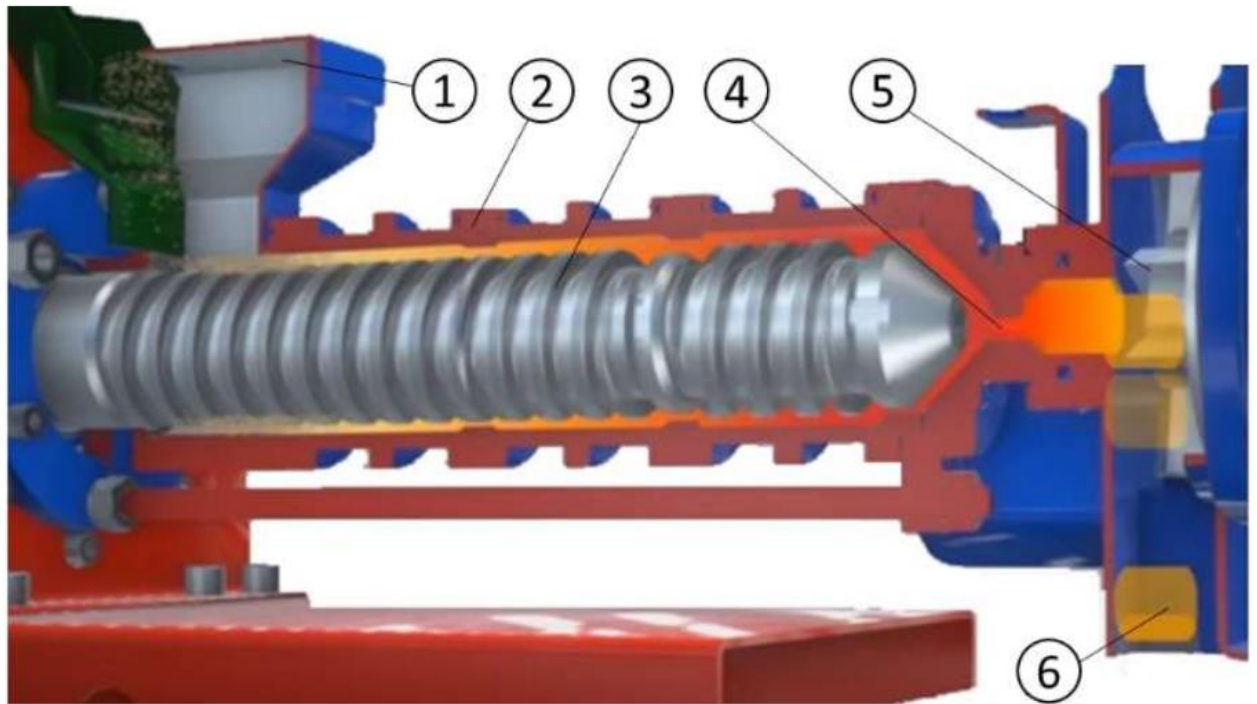


Рисунок 1.4 – Зони шнекової камери одношнекового екструдера: 1 – приймальна камера; 2 – робоча камера; 3 – шнек; 4 – фільтр; 5 – ніж; 6 – екструдат

Ця зона робочої камери екструдера називається зона ущільнення та плавлення матеріалу або зона пластифікації. В результаті плавлення матеріал перетворюється на в'язкопластичну масу. Температура рослинного матеріалу у зоні плавлення сягає 40-60°C. У зоні дозування чи структуроутворення розплавлений матеріал гомогенізується. Температура матеріалу у зоні дозування сягає

110-150°C. Наприкінці цієї зони розплав представляє собою повністю гомогенну (однорідну) масу. Розплав матеріалу з передматричної камери під тиском продавлюється крізь фільтеру матриці. При його виході з матриці під дією різкої зміни тиску (від 15-25 МПа до атмосферного) відбувається майже миттєве випаровування як вільної, так і частини пов'язаної вологи, та зміна фізичної структури рослинного матеріалу, зокрема різке збільшення його об'єму та пористості, що призводить до остаточного формування екструдату.

Шнекові прес – екструдери за формою корпусу поділяють на циліндричні та конічні. Форма шнека має повторювати форму шнекового корпусу. В одношнековому екструдері конічної форми відбувається збільшення заповнення пресуючого механізму екструдованим матеріалом, за рахунок звуження діаметра шнекового корпусу у напрямку до формує отвору, що дозволяє підвищити тиск пресування. Завдяки простоті у виготовленні та експлуатації, переважне використання знаходять шнекові корпуси циліндричної форми, рисунок 1.5.

Шнек є основним робочим елементом шнекових екструдерів. Він захоплює завантажувальний кормовий матеріал від завантажувального пристрою та переміщує його вздовж корпусу. При цьому матеріал розігрівається, стає пластичним, здавлюється, гомогенізується та екструдується у вигляді однорідної маси. Залежно від виробничих потреб виготовляють шнеки як з універсальною, так і зі спеціальною геометрією, яка підбирається з враховуючи умови переробки кормового продукту, а для забезпечення технологічності його модулі виконуються з постійними геометричними параметрами, при цьому вони збираються на загальному валу та фіксуються шліцевими з'єднаннями та шпонками.

В основному на практиці застосовують кілька конструктивних рішень з метою підвищення тиску, який розвивається при екструдванні та зниження протитечії переробленого матеріалу, для цього на вихідній ділянці крок шнека виконують зменшується. За рахунок зменшення висоти лопаті можна отримати зниження протитечії між гвинтовими лопатями шнека.

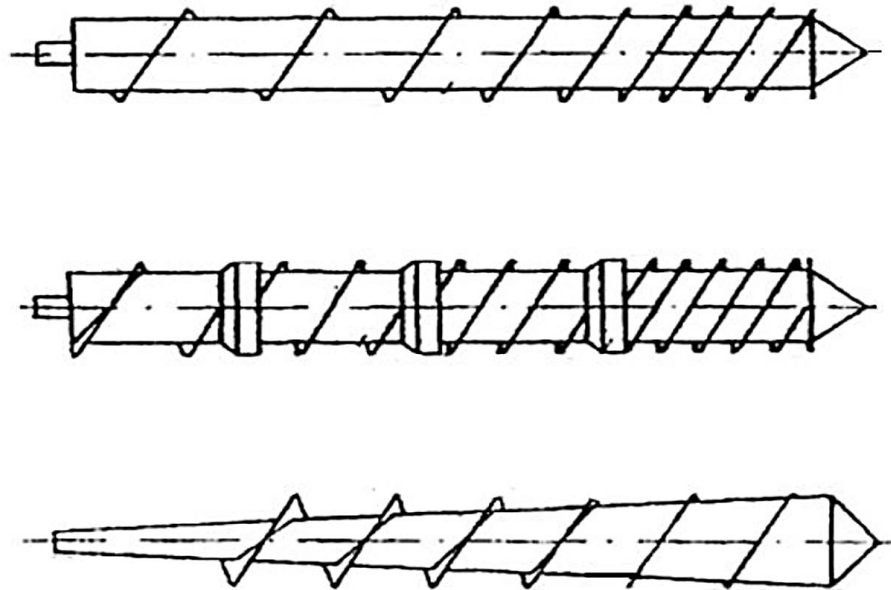


Рисунок 1.5 – Структурні схеми одношнекових пресуючих механізмів: 1 – шнек з однією лопаттю постійного кроку та змінною висотою лопаті; 2 – шнек з лопатою змінного кроку та постійною висотою лопаті; 3 – шнек, розділений на секції компресійними затворами, зі змінним кроком лопаті та змінним числом лопатей у секціях

Правильно підібрана геометрія шнека не тільки дозволяє виготовити більше продукції за менший час циклу, а й продовжити термін служби самого шнека.

За конструктивним виконанням шнекові прес – екструдери діляться на:

- шнек з однією лопаттю постійного кроку та змінною висотою;
- шнек з лопатою змінного кроку та постійною висотою;
- шнек, розділений на секції компресійними затворами, з змінним кроком лопаті та змінним числом лопатей у секціях.

Конструктивні особливості вузлів та деталей шнекового механізму істотно впливають на процес екструдювання. За типом основного робочого органу,

екструдери поділяють на: шнекові, валкові, комбіновані, дискові, поршневі, шестеренні. Поршневі та валкові екструдери надають щадний вплив на продукт, що переробляється, їх використовують для формування продукту з ніжною консистенцією. Валкові екструдери застосовують у машинах без матриць, шестеренні для формування однорідних і гомогенних матеріалів машинах із матрицями. За фізичними ознаками шнекові екструдери ділять на дві групи, відрізняються термодинамічні особливості: автогенні, тобто з коротким шнеком та політропні, зі шнеком змінної довжини.

Зі шнеком змінної довжини – застосовують для розігріву до необхідної температури, існує можливість її регулювання з допомогою додаткового зовнішнього підведення тепла, що дозволяє швидко вийти на робочий режим та стабілізувати його.

З коротким шнеком – це та, необхідна теплова енергія для протікання процесу екструдювання, за такого режиму вона утворюється лише за рахунок сил тертя. При екструзійній обробці зернового матеріалу для отримання екструдованих кормових продуктів рекомендується застосовувати з коротким шнеком - автогенні.

За способом екструдювання екструдери поділяються на сухий та вологий. По виду одержуваного продукту у вигляді трубки, джгута, пластівців і гранул. Також, у перерахованих вище екструдерів існує наявність ознак визначають їх схожість:

- робочий орган – один або декілька, вузол завантаження сировини, фільтерна пластина (екструзійна головка), що дає готовому виробу форму;

- технологічний процес екструзії складається з послідовного переміщення матеріалу робочим органом, що обертається, в його зонах: живлення, пластифікації, дозування розплаву, а потім просування його в каналах формуючої голівки та охолодження екструдата.

В даний час найбільш універсальними пресуючими механізмами по праву

вважаються шнекові пресувальні пристрої, що відрізняються технічними характеристиками. Широта діапазону реологічних властивостей пресованого матеріалу та різноманітність властивостей, екструдованої продукції викликають величезний інтерес у споживачів сільськогосподарської галузі.

Розвиток шнекових пресуючих механізмів призвело до створення різних за структурою та конструкцією пристроїв. З усього різноманіття їх привертають увагу екструдери. Одне з переваг, які варто відзначити, це те, що більшість сучасних одношнекових екструдерів мають автоматизоване керування. На рис. 1.6, як приклад показана схема шнека зі змінною глибиною спірального каналу (зі змінною глибиною нарізки), а також наведено його геометричні параметри.

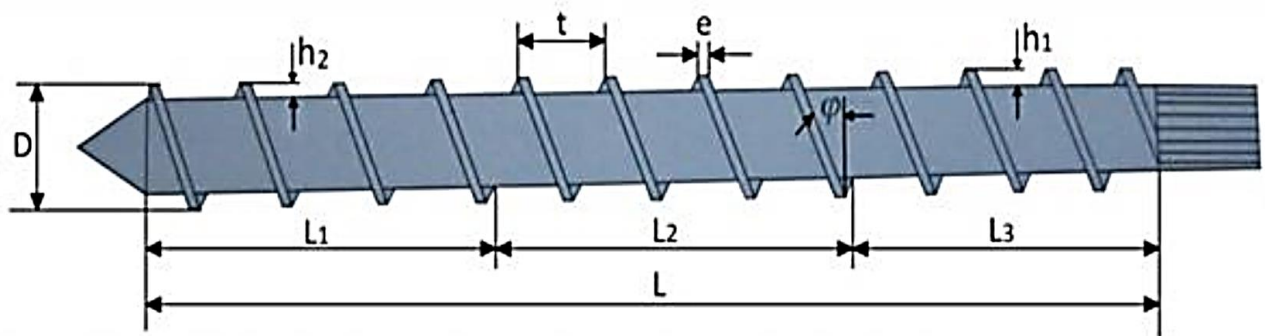


Рисунок 1.6 – Параметри шнека екструдера

Важливі параметри шнека, що характеризують його роботу: довжина (L) та діаметр (D), а також відношення довжини до діаметру (L/D); глибина нарізки на початку та кінці шнека (h_1 та h_2); довжини відрізків з різною глибиною нарізки (L_1 , L_2 , L_3); ширина гребеня (e); крок витка (t); кут гвинтової нарізки (ϕ).

Діаметр шнеків екструдерів для переробки рослинної сировини складає від 20 до 200 мм. Зазвичай використовують шнеки наступних діаметрів: 20; 32; 45; 50; 52; 55; 60; 63; 90; 125; 160; 200 мм. Чим більше діаметр шнека, тим вища продуктивність екструдера. Довжина шнека L характеризується її відношенням до діаметру D (L/D). Це співвідношення може змінюватися в інтервалі від 8 до

40. Коротко шнекові екструдери мають співвідношення $L/D=12\dots18$, а довго шнекові – $L/D > 30$. Найбільш поширені екструдери із відношенням $L/D = 20\dots25$. Збільшення довжини шнека L сприяє утворенню більш гомогенного розплаву матеріалу, так як тривалість впливу на нього шнека збільшується.

Розмір таких параметрів шнека, як крок гвинтової нарізки t і ширина гребня витка e узгоджуються з його діаметром d , як правило, становлять $t=d$, $e=0,1d$.

Для шнеків зі змінною глибиною гвинтової нарізки розрізняють глибину на початку h_1 і наприкінці h_2 шнека. Їхнє відношення зазвичай становить від $1/2$ до $1/3$. При екструдюванні кормів, що включають зелену рослинну масу, найбільш ефективний шнек із змінною глибиною нарізки: у зоні пластифікації глибина більша, ніж у зоні живлення (змішування).

Під час переробки рослинного матеріалу з підвищеним вмістом вологи, від 25% і більше, виникає необхідність її видалення. У даних випадках після зони плавлення застосовують геометрію профілю шнека, яка передбачає ділянку із збільшеним по відношенню до діаметра кроком. У модулях змішувального типу для змішування різних видів компонентів сировини передбачаються спеціальні елементи: розминаючі, місильні, гомогенізуючі. За допомогою них можна змінювати час перебування перероблюваного матеріалу в шнековій камері та ці елементи дозволяють покращити ефект, що переміщує. Коли місильні елементи відсутні, процес змішування протікає поступово протягом усього руху оброблюваної маси, але з меншою інтенсивністю.

Встановлено, що енергія, що витрачається на процес екструдювання в зокрема кормових продуктів, витрачається на стиск та роздавлювання продукту, його переміщення та подолання виникаючих сил тертя. Потужність, що витрачається на стиск матеріалу у гвинтовому каналі, становить 30-40% від повної потужності. Закономірності зміни споживаної потужності від ступеня стиснення матеріалу, що переробляється змінюються за нелінійною залежністю.

Чим вище ступінь стиснення перероблюваного матеріалу, тим більше споживана потужність на приводі прес – екструдера.

При обертанні шнека поверхня витків, вступаючи у дотик із частками матеріалу, надає ним тиск, що передається до сусідніх частинок, що не перебувають у даний момент у безпосередньому зіткненні з витками. При цьому спостерігається значне тертя частинок по робочих поверхнях, тертя частинок один про одну і внутрішнє тертя в частках, пов'язане з їх пластичними деформаціями. У матеріалі, що переробляється, виникає висока повна напруга (створювана сумою нормальних та дотичних напруг), пласти матеріалу починають наїжджати один на одне, утворюючи в перероблюваному матеріалі пори. Це призводить до великої витрати енергії при роботі шнекового преса та зниження щільності перероблюваного матеріалу.

При проведенні екструзійної обробки важливим є забезпечення умов якомога нижчої повної напруги в перероблюваному матеріалі в зонах плавлення та дозування з метою запобігання механічному руйнуванню матеріалу та зниження енергоємності процесу екструзії а також одночасно створення якомога більш високої щільності, з метою отримання готового продукту на виході з екструдера більш щільної та міцної структури, що забезпечує необхідне якість екструдованого кормового продукту.

Шнеки екструдерів мають різну конфігурацію (геометричний профіль), зокрема існують шнеки з постійним та змінним кроком витків. Шнекові прес-екструдери на сьогоднішній день дуже різноманітні та відрізняються один від одного, як конструкцією в цілому, так і конструктивними параметрами шнеків: довжиною, поділом на зони, числом заходів, кроком гвинтової лінії, глибиною та профілем нарізки, формою кінця шнека, матеріалом із якого виготовляється шнек. За кількістю робочих органів шнековий екструдер ділиться: одношнековий, двошнековий та багатошнековий; – за частотою обертання шнека на нор-

мальні та швидкохідні; - по конструктивному виконанню з шнеком, що обертається, і корпусом, що обертається; - за характером руху продукту - безперервні та періодичні; – за параметрами робочого органу з переривчастими та безперервними лопатями, одно та багатозахідні; - з переривчастими лопатями діляться з компресійним затвором, з проточками, з формою міжвиткових каналів, напівеліптичні, несиметричні та прямокутні; – одне і багатозахідні свою чергу діляться на цілий чи складовий шнек, зі змінним або постійним кроком, циліндричний або конічний та величина кроку гвинтового каналу. Виходячи з досліджень класифікації шнекових пресуючих механізмів та їх конструкції можна зробити висновок, що найбільший інтерес для дослідження представляють одношнекові екструдери, оскільки вони технологічні у виготовленні, найбільш поширені та перспективні удосконалення.

Так як процеси, що відбуваються в кожній зоні екструдера різні, найбільш доцільно виготовляти шнек екструдера складовим. Завдяки такій конструкції можна досягти зміну геометрії шнека в залежності від процесу робочої частини екструдера, що проходить у цьому місці. Необхідно вивчити параметри кроку шнека у кожній зоні. Для забезпечення хорошої продуктивності машини ми пропонуємо зробити збільшений крок шнека зони живлення. У конструкції екструдера ми пропонуємо використовувати двозахідний шнек (рис. 1.7).

Застосування такого рішення обумовлено таким:

1. За рахунок додаткового гребеня на валу зростає практично у два рази тиск, що призводить до більшого тертя між матеріалом та робочою частиною екструдера, що дозволить скоротити загальну довжину шнека.

2. За рахунок додаткових гребенів на валу збільшується площа контакту матеріалу з частинами робочих органів екструдера, що обертаються. Це дозволить швидше виходити на задану температуру обробки та зменшити довжину шнека екструдера.

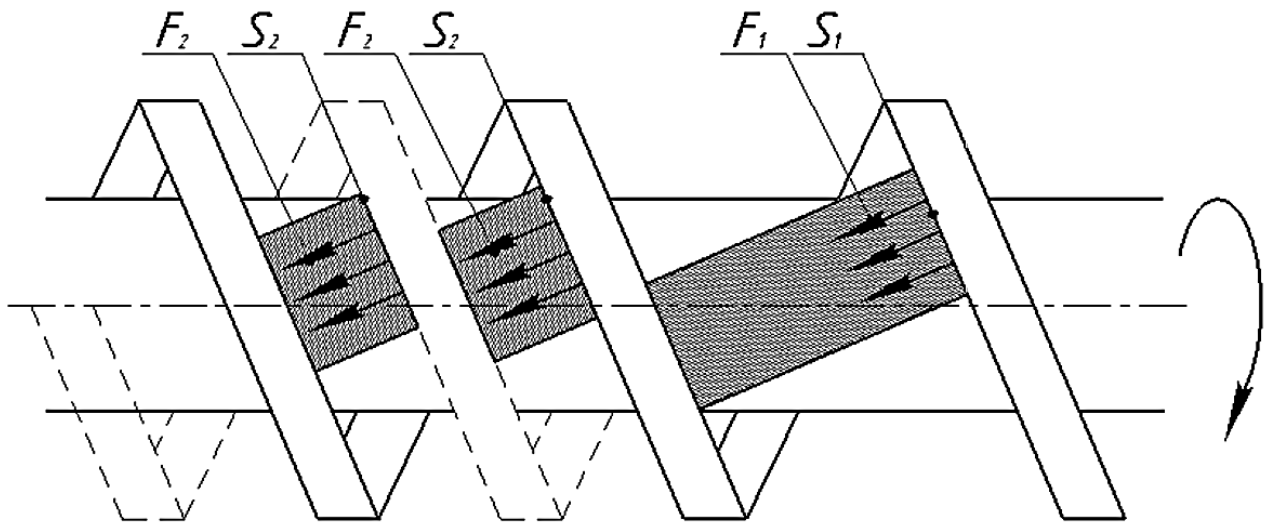


Рисунок 1.7 – Порівняння конструкції однозахідного та двозахідного шнека: F_1 – сили, що діють з боку шнека на матеріал при однозахідному шнеку; S_1 – площа контакту між гребенем шнека та матеріалом при однозахідному шнеку; F_2 – сили, що діють з боку шнека на матеріал при двозахідному шнеку; S_2 – площа контакту між гребенем шнека та матеріалом при двозахідний шнек;

В даний час не вивчено питання впливу на процес екструдювання двозахідного шнека. Компресійні затвори в екструдері дозволяють створювати циркуляційний потік витоків. Роботи з вивчення впливу компресійних затворів в екструдері присвячені циліндричним компресійним затворам. Ми пропонуємо використовувати конічні компресійні затвори. Їх застосування дозволить знизити витрату енергії та забезпечити краще проходження матеріалу, що дозволить зменшити забиваність робочої частини екструдера. Конструктивні параметри компресійних кілець значно впливають на температуру обробки в екструдері. Мінімальна температура при якій відбувається обробка корму в екструдері складає $120\text{ }^{\circ}\text{C}$. Тому стоїть необхідність підбору кілець, які забезпечуватимуть такий температурний режим. Для приготування зернового корму доцільно взяти за основу конструкцію екструдера для обробки кормів. Однак режими

екструдкування кормів відрізняються від режимів обробки запропонованої суміші. Отже, існуючі методи розрахунку кормових екструдерів повністю не підходять для обґрунтування конструктивних та технологічних параметрів. Аналіз проведених досліджень показав, що вплив на процес екструдкування двозахідного шнека та конічних компресійних кілець достатньо вивчений, і тому для вдосконалення робочих органів та обґрунтування конструктивних та технологічних параметрів екструдера необхідно провести додаткові дослідження.

1.4 Висновки по розділу

В результаті аналізу видів кормів та способів їх приготування встановлено, що найбільш ефективним є корми, отримані енергоємними способами, що змінюють їх фізико-механічні та хімічні властивості. Найбільш перспективним технологічним рішенням є застосування екструдкування, що підвищує засвоюваність кормів до 30%, знижує питому вартість та витрату в середньому до 25%. Однак екструдкування є дуже енергоємним процесом, тому зменшення енергоємності є актуальним питанням.

2 Теоретичні дослідження шнекового екструдера

2.1 Математичне моделювання процесу пресування в екструдері

Для забезпечення необхідних експлуатаційних характеристик екструдера (температура обробки корму, тиск екструдювання, продуктивність та т.д.) необхідно математично описати роботу запропонованої конструкції. Математичні залежності дозволять визначити конструктивні та технологічні параметри, що впливають на ефективність виробництва екструдованих кормів. При русі каналом екструдера швидкість потоку сповільнюється, за рахунок ущільнення та циркуляційних потоків. Матеріал виходить із робочої зони екструдера через отвір, що має можливість змінювати площу прохідного перерізу.

Регулювання цієї площі дозволяє домогтися зміни тиску в екструдері та відповідно температури обробки корму. Тиск, створюваний шнеком екструдера, що дорівнює тиску, при якому буде проходити продавлювання матеріалу через отвір. Цей тиск впливає на зміна тиску по всій довжині шнека екструдера.

Для знаходження тиску випресовування P_p , розглянемо рух матеріалу через кільцевий конічний канал фільтери (рис. 2.1) та позначимо сили які врівноважують елементарний шар стиснутої сапропелезернової суміші товщиною dx з відривом x від початку каналу.

Зазор для проходження матеріалу утворюється конічною поверхнею фільтери та конічною поверхнею валу. Для елементарної ділянки товщиною dx складемо диференціальне рівняння рівноваги щодо горизонтальної осі X .

$$P_x(2\pi S r_x - \pi S^2) - (P_x + dP)\pi(2\pi S r_x - \pi S^2) - F_{тр1} \cos\alpha - F_{тр2} \cos\alpha = 0 \quad (2.1)$$

де P_x - тиск на поточній ділянці каналу, Па;

$F_{тр1}$; $F_{тр2}$ – сили тертя на стінці фільтери та валу відповідно, Н;

S – зазор між фільтерою та валом, м;

r_x - радіус поточної ділянки каналу, мм.

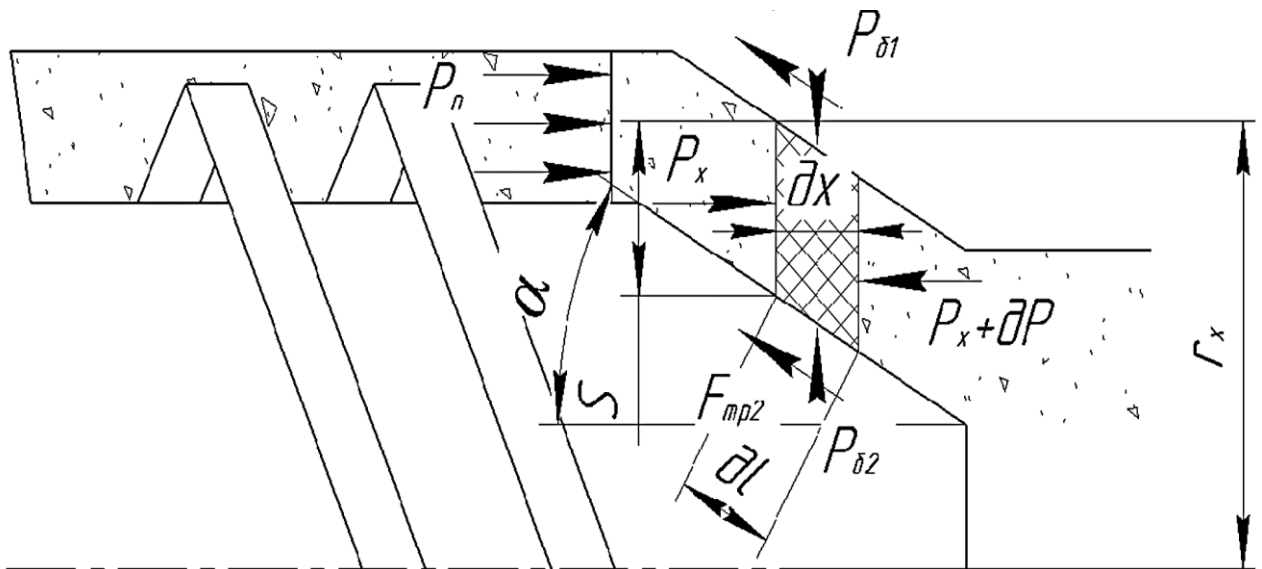


Рисунок 2.1 – Рух матеріалу у формуючій головці екструдера

Виразимо силу тертя через бічний тиск:

$$F_{\text{тр1}} = 2\pi r_x dl f P_{\delta 1} \cos \alpha \quad (2.2)$$

$$F_{\text{тр2}} = 2\pi (r_x - S) dl f P_{\delta 2} \cos \alpha \quad (2.3)$$

де $P_{\delta 1}$; $P_{\delta 2}$ – бічний тиск на поточній ділянці каналу на стінці фільтери і валу відповідно, Па;

dl - ширина ділянки конуса, м;

α – кут нахилу утворює конуса, град;

f - Коефіцієнт тертя. Використовуючи рис. 2.1, виразимо ширину ділянки конуса за допомогою товщини елементарного шару dx і кута нахилу утворюючого конуса

$$dl = \frac{dx}{\cos \alpha} \quad (2.4)$$

Підставивши вираз 2.1 формули 2.2; 2.3, 2.4 та зробивши необхідні перетворення, отримаємо:

$$dP\pi(2Sr_x - S^2) = 2\pi dx f P_{\phi 1} \cos\alpha (2r_x - S) \quad (2.5)$$

Залежність бічного тиску від осьового вважаємо лінійною на всьому інтервалі зміни осьового тиску і виражаємо формулою:

$$P_b = \xi P_x \quad (2.6)$$

де ξ -коефіцієнт бічного тиску;

μ - коефіцієнт Пуассона.

Коефіцієнт бічного тиску визначається за формулою:

$$\xi = \mu / (1 + \mu) \quad (2.7)$$

Підставляючи вираз 2.5 вирази 2.6, 2.7 і зробивши деякі перетворення, отримаємо:

$$- dP P_x = 2\xi f \cos\alpha S dx \quad (2.8)$$

Проінтегрувавши обидві частини рівняння від P_0 до P_x та від 0 до x , отримаємо рівняння для знаходження тиску у фільтрі:

$$P_x = P_0 e^{-2\xi f x \cos\alpha S} \quad (2.9)$$

де P_0 тиск на виході з отвору, Па;

x – відстань від початку каналу до точки визначення тиску m .

Рівняння 2.9 дозволяє визначити тиск у будь-якій точці вихідного отвору

фільтери. Використовуючи це рівняння визначимо тиск випресовування P_{Π} .

$$P_{\Pi} = P_0 e^{-2\xi f l \cos \alpha S} \quad (2.10)$$

де l - Довжина отвору, мм.

При розрахунку екструдера та порівняння його характеристик з іншими пристроями зручніше використовувати замість значення зазору між фільтерою та валом S площу прохідного перерізу у фільтері $S_{\text{отв}}$, яка залежить від S та виражається формулою:

$$S_{\text{отв}} = \pi(2r_0 S - S^2) \quad (2.11)$$

де r_0 - радіус циліндра екструдера, мм.

Формула 2.10 показує, що тиск пресування залежить від конструктивних параметрів фільтери, а саме її довжини l та кута нахилу утворюючого конуса α . На графіці (рис. 2.2) показано теоретичну залежність зміни тиску випресовування від довжини фільтери при $\alpha = 30$ град.; $\xi = 0.43$; $f = 0.4$; площі прохідного перерізу $S_{\text{отв}} = 1,1 \text{ см}^2$. На графіку видно, що зі збільшенням довжини фільтери збільшується тиск випресовування. Ця залежність дозволяє ще на етапі проектування екструдера задавати необхідну, для створення необхідного максимального тиску обробки корму, довжину фільтери.

Тиск пресування залежить і від зазору S , який регулюється завдяки зміні площі прохідного перерізу формуючого отвору $S_{\text{отв}}$. На графіку (рис.2.3) показано теоретичну залежність зміни тиску випресовування від площі прохідного перерізу при $\alpha = 30$ град.; $\xi = 0.43$; $f = 0.4$; $l = 9$ мм. Аналізуючи графік можна зробити висновок, що при збільшенні прохідного перерізу тиск зменшується. Ця залежність дозволяє змінювати в процесі експлуатації екструдера тиск обробки корму в залежно від його складу.

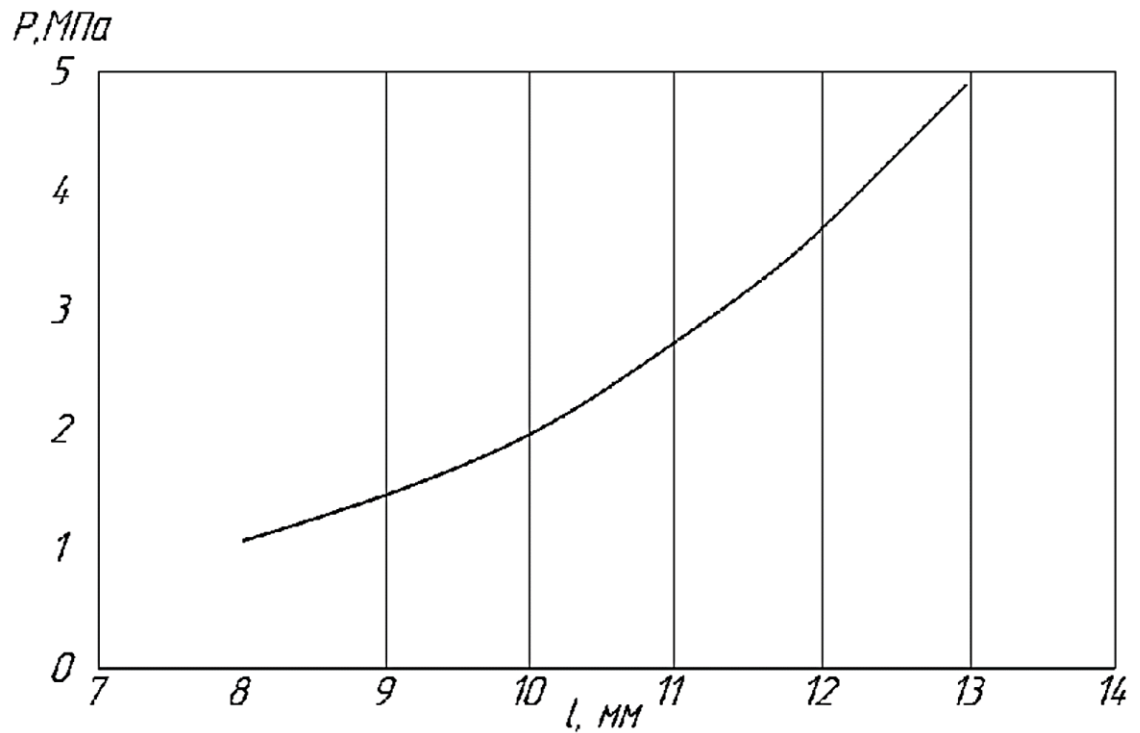


Рисунок 2.2 – Залежність зміни тиску випресовування від довжини фільтри

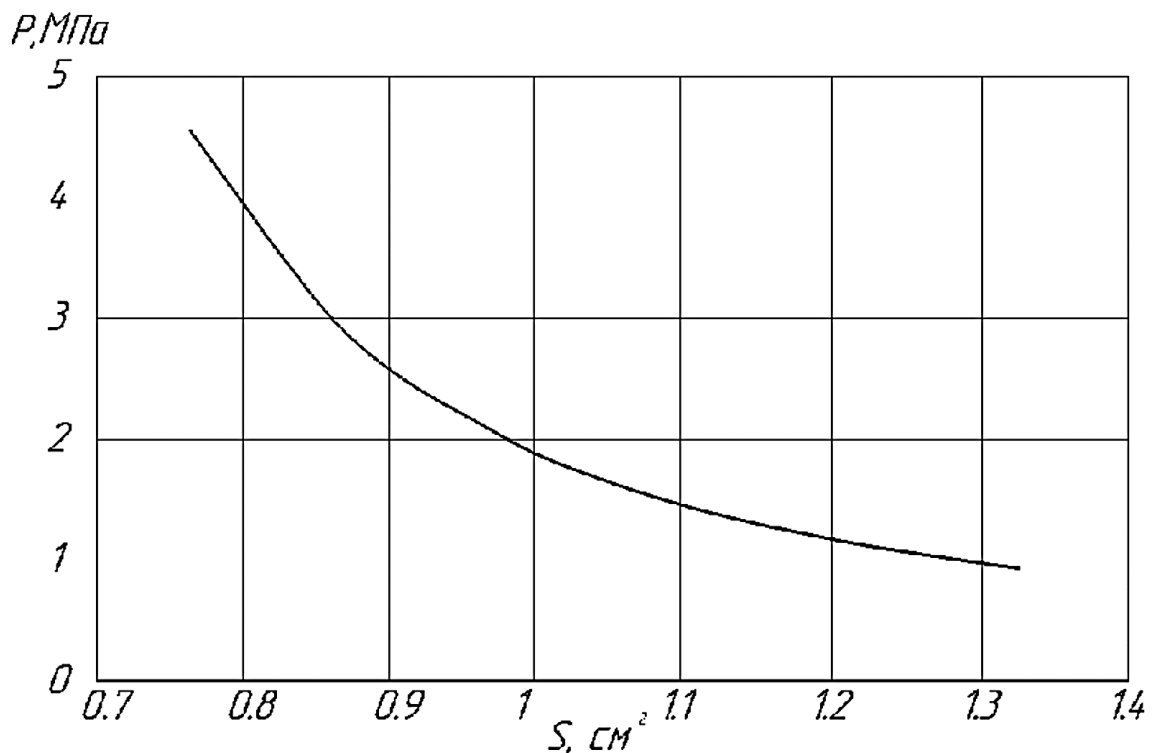


Рисунок 2.3 – Залежність зміни тиску випресовування від площі прохідного перерізу фільтри

Для швидкого зростання тиску та відповідно температури в екструдері використовують компресійні затвори. Їх застосування дозволяє по всій довжина

шнека розвивати високий тиск. Завдяки цьому нагрівання суміші відбувається швидше та з'являється можливість зменшення довжини шнека. Наявність компресійного затвора також сприяє гомогенізації переробленого корми. Для визначення тиску проходження через компресійний затвор P_{II} зернової суміші складемо схему деформації матеріалу при проходженні через конічний зазор (рисунок 2.4). На схемі матеріал рухається ліворуч право під дією сили P_x . Зазор, що звужується, утворюється за рахунок конічні поверхні кільця.

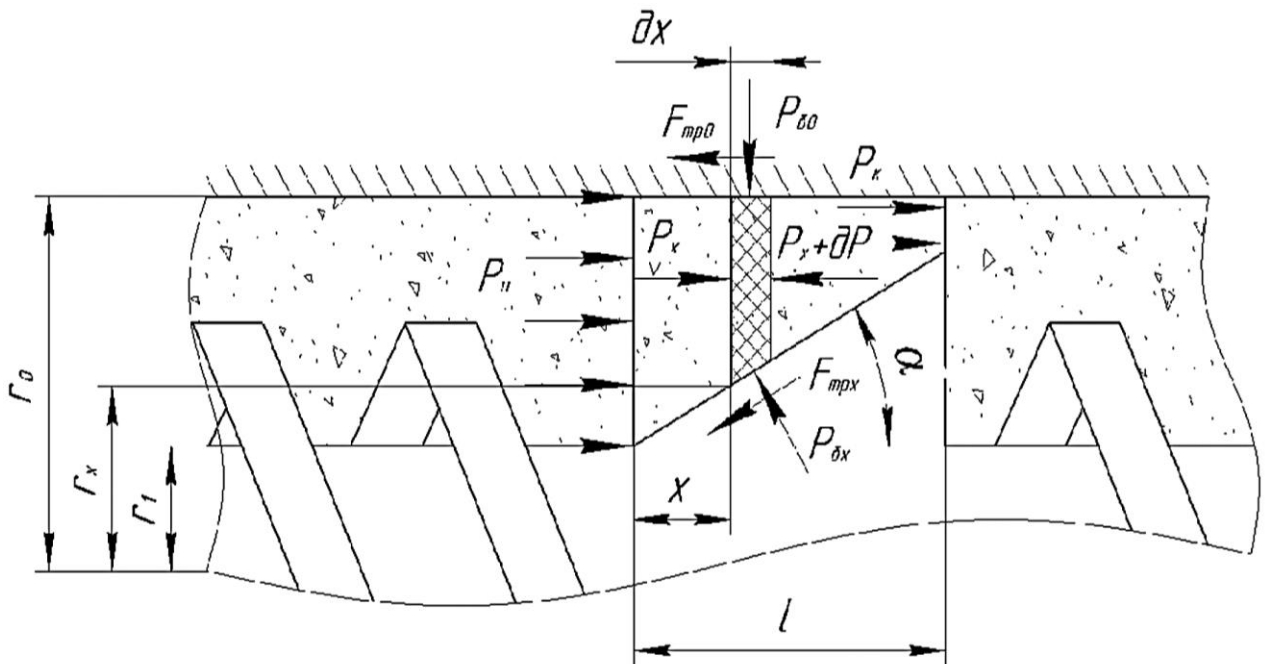


Рисунок 2.4 - Рух матеріалу в затворі компресійного кільця екструдера

Складемо для елементарної ділянки завтовшки dx диференціальне рівняння рівноваги щодо горизонтальної осі X .

$$P_x \pi (r_0^2 - r_x^2) - (P_x + dP) \pi (r_0^2 - r_x^2) - F_{тр0} - F_{трx} \cos \alpha - P_{\delta x} 2\pi r_x dl \sin \alpha = 0 \quad (2.12)$$

де P_x – тиск на поточній ділянці компресійного затвора, Па;

$F_{тр0}$; $F_{трx}$ – сили тертя на стінці циліндра та компресійного кільця відповідно, Н;

$P_{\text{бх}}$ - бічне тиск на стінці компресійного кільця, Па;

r_x - радіус поточної ділянки компресійного кільця, мм;

r_0 - радіус циліндра екструдера, мм;

α - кут конуса компресійного кільця, град.

Виразимо силу тертя через бічне тиск:

$$F_{\text{тр0}} = 2\pi r_0 dx f P_{\text{б0}} \quad (2.13)$$

$$F_{\text{трх}} = 2\pi r_x dl f P_{\text{бх}} \quad (2.14)$$

де $P_{\text{б0}}$ - бічне тиск на стінці циліндра екструдера, Па;

Використовуючи рис. 2.4 виразимо елементарну ширину ділянки конуса з допомогою товщини елементарного шару dx та кута конуса компресійного кільця α і запишемо вираз:

$$dl = dx / \cos \alpha \quad (2.15)$$

Складемо для елементарної ділянки завтовшки dx диференціальне рівняння рівноваги щодо вертикальної осі Y .

$$P_{\text{б0}} 2\pi r_0 dx - P_{\text{бх}} 2\pi r_x dl \cos \alpha + F_{\text{трх}} = 0 \quad (2.16)$$

Підставивши рівняння 2.16 рівняння 2.14, отримаємо:

$$P_{\text{б0}} 2\pi r_0 dx - P_{\text{бх}} 2\pi r_x dl \cos \alpha + P_{\text{бх}} 2\pi r_x f dl \rho \quad (2.16)$$

Підставимо в рівняння 2.17 рівняння 2.15, зробимо перетворення та висловимо змінну $P_{\text{б0}}$:

$$P_{60} = P_{6x} r_x (1 - f t g \alpha) / r_0 \quad (2.18)$$

Залежність бічного тиску від осьового виражаємо формулою:

$$P_{6x} = \xi P_x \quad (2.19)$$

Підставивши у формулу 2.13 вираз 2.18 та 2.19 зробимо необхідні перетворення та отримаємо:

$$F_{тр0} = 2\pi r_x \xi P_x dx f (1 - f t g \alpha) \quad (2.20)$$

Після підстановки рівняння 2.12 виразів 2.14, 2.15, 2.19 та 2.20 отримаємо:

$$\begin{aligned} dP\pi(r_0^2 - r_x^2) - 2\pi r_x \xi P_x dx f (1 - f t g \alpha) - 2\pi r_x dx f \xi P_x - \\ - P_{6x} 2\pi r_x dx t g \alpha = 0 \end{aligned} \quad (2.21)$$

На малюнку 2.2 визначимо радіус ділянки компресійного кільця на відстані x .

$$r_x = r_1 + x t g \alpha \quad (2.22)$$

де: r_1 – початковий радіус компресійного кільця, м;

x – відстань від початку кільця до елементарної ділянки dx .

Підставивши до рівняння 2.21 рівняння 2.22 та здійснивши необхідні перетворення отримаємо:

$$\frac{dP}{P_x} = \frac{2\xi(r_1 + x t g \alpha)(2f - t g \alpha - f^2 t g \alpha)}{r_0^2 - (r_1 + x t g \alpha)^2} dx \quad (2.23)$$

Проінтегрувавши обидві частини рівняння від P_{Π} до P_{κ} та від 0 до 1, отримаємо вираз для знаходження тиску, що діє на перероблений матеріал у будь-якій точці компресійного затвора:

$$P_x = \frac{P_{\kappa}}{\left(\frac{(r_1 + l \operatorname{tg} \alpha)^2}{r_1^2 - r_0^2}\right)^{0,5\xi \left(\frac{2f}{\operatorname{tg} \alpha} - 1 - f^2\right)}} \quad (2.24)$$

Рівняння 2.24 дозволяє визначити тиск у будь-якій точці компресійного затвора. Використовуючи це рівняння визначимо тиск пресування перед компресійним затвором $P_{\Pi\kappa}$.

$$P_{\Pi} = \frac{P_{\kappa}}{\left(\frac{(r_1 + l_{\kappa} \operatorname{tg} \alpha)^2}{r_1^2 - r_0^2}\right)^{0,5\xi \left(\frac{2f}{\operatorname{tg} \alpha} - 1 - f^2\right)}} \quad (2.25)$$

де l_{κ} - Довжина компресійного кільця, м.

Використовуючи отриману залежність, побудуємо графік зміни тиску пресування перед компресійним кільцем від його довжини (рис. 2.5) при $P_{\kappa} = 1,05$ МПа; $r_1 = 0,014$ м; $r_0 = 0,019$ м $\xi = 0,43$; $f = 0,4$.

На графіку видно, що зі збільшенням довжини компресійного кільця тиск збільшується, а це означає, що зростатиме і середній тиск екструдуювання та температура обробки. Довжину компресійного кільця можна змінювати на екструдері в процесі роботи залежно від необхідних режимів обробки суміші. Використовуючи отримані теоретичні залежності, можна розрахувати тиск що впливає на екструдований матеріал у будь-якій точці валу екструдера.

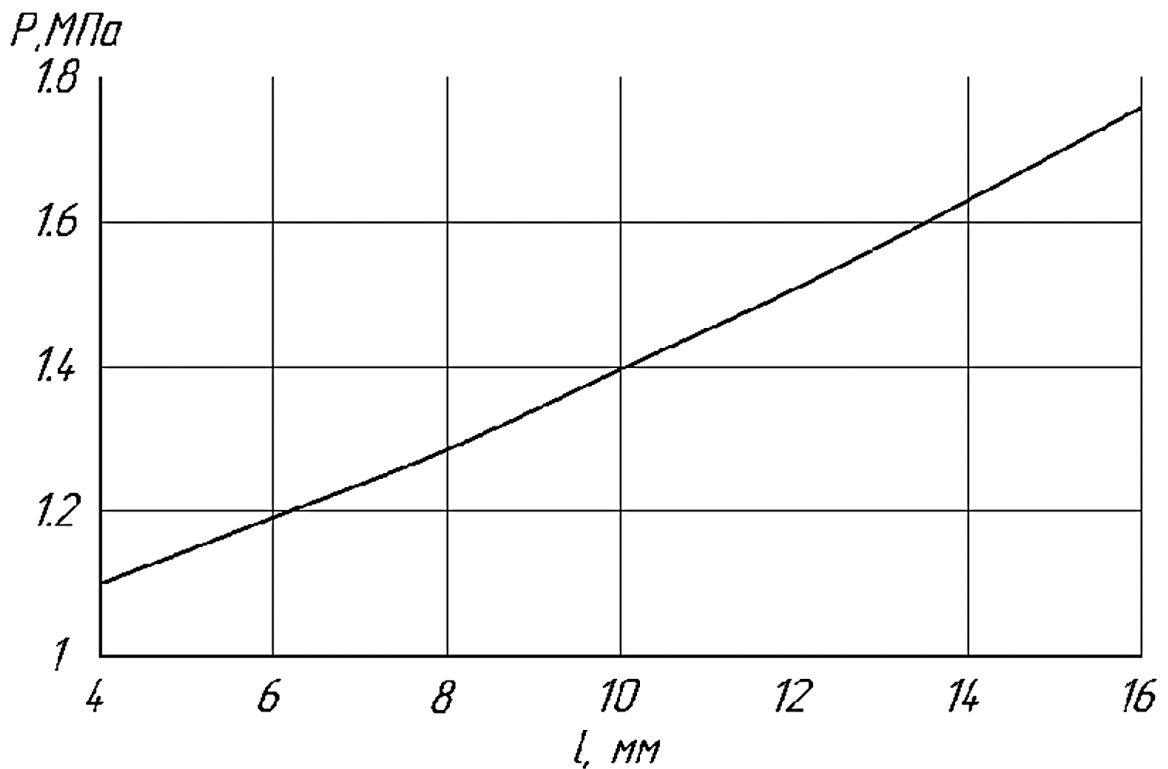


Рисунок 2.5 – Зміна тиску пресування перед компресійним кільцем від його довжини

Для визначення тиску випресовування перед фільєрою P_{Π} використовуємо формулу 2.10. Тиск перед компресійними кільцями $P_{\text{пк1}}$ та $P_{\text{пк2}}$ розраховуємо, використовуючи формулу 2.25. Залежність тиску створюваного шнеком лінійна за його довжиною. Тому запишемо рівняння для розрахунку тиску після компресійних затворів $P_{\text{к2}}$ та $P_{\text{к1}}$.

$$P_{\text{к2}} = \frac{P_{\Pi}(l_1 + l_2)}{l_1 + l_2 + l_3} \quad (2.26)$$

$$P_{\text{к1}} = \frac{P_{\Pi}l_1}{l_1 + l_2} \quad (2.27)$$

де l_1 ; l_2 ; l_3 – довжина першої, другої та третьої ділянки шнека відповідно. Для розрахунку тиску в будь-якій точці шнека використовуємо вираз:

$$P_{x,n} = \frac{(P_{пn} - P_{кn})l}{l_n} \quad (2.28)$$

де $P_{пn}$ - тиск перед компресійним кільцем (наприкінці n -го шнека), Па;

$P_{кn}$ - тиск на початку компресійного кільця n -го шнека, Па;

l - довжина від початку шнека до точки визначення тиску, м;

l_n - довжина n -го шнека, м.м.

На рис. 2.6 показано графіки зміни тиску в конструкції екструдера з компресійними затворами P_k та без них P_w .

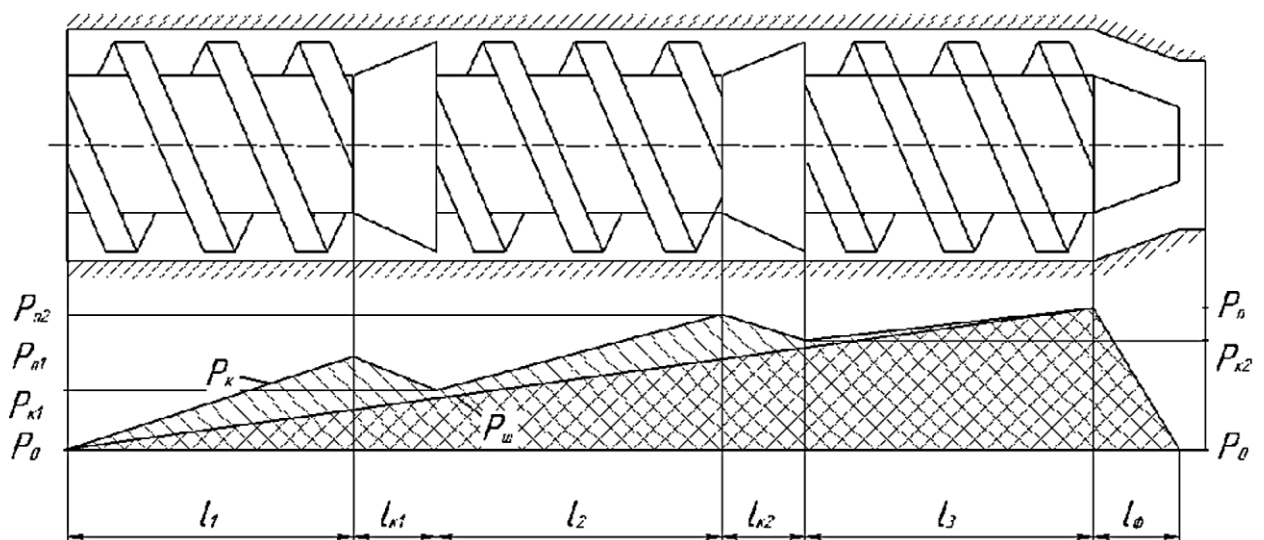


Рисунок 2.6 – Зміна тиску в екструдері за наявності конічних компресійних затворів і без них

На рисунку видно, що застосування конічних компресійних затворів збільшує середній тиск суміші в екструдері, а це означає, що нагрівання суміші відбуватиметься інтенсивніше, що дозволяє зменшити довжину шнека.

В результаті проведеного теоретичного дослідження впливу конструктивних параметрів екструдера на зміну тиску екструдуювання, встановлено, що найбільший вплив на цей показник має довжина формуючої головки, площа вихідного перерізу формуючої головки та довжина компресійного кільця. Отри-

мано рівняння (2.10; 2.25; 2.26; 2.27), що дозволяють у будь-якій точці екструдера визначити тиск. проведений розрахунок зміни тиску з конічними компресійними кільцями та без них обґрунтував їх застосування у конструкції екструдера для виробництва зернової суміші.

2.2 Теоретичне обґрунтування конструктивних та технологічних параметрів екструдера

Процес екструдювання корму з додаванням сапропелю поділяється на чотири етапи (рис. 2.7). У зв'язку з цими етапами робочий орган екструдера можна розділити на зони: перша зона завантаження та транспортування суміші, друга ущільнення, третій течії, четвертий пресування. Даний поділ є умовним, так як шнек є єдиним безперервним шляхом для корму. Поділ заснований на різних процесах, що відбуваються на кожній частини шнека екструдера.

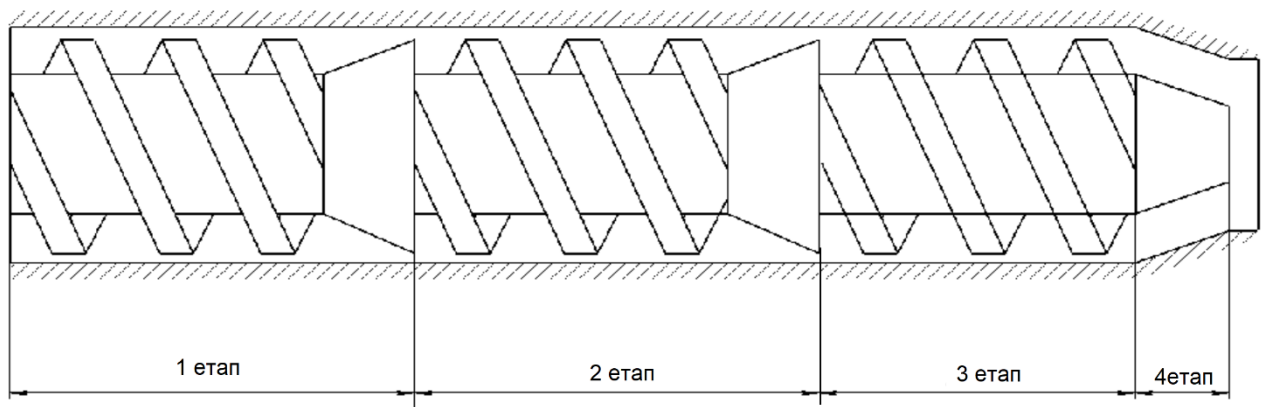


Рисунок 2.7 – Етапи екструдювання корму

На першому етапі дозатор подає суміш у першу зону. Маса попередньо ущільнюється під впливом незначного тиску. Для цього етапу характерно стиснення матеріалу за рахунок видалення із суміші повітряних порожнин.

На другому етапі відбувається подальше ущільнення матеріалу, але вже під впливом вищого тиску. Тут відбувається руйнування частинок корму під впливом напруг, що перевищують межу пластичності. Закінчується цей етап,

коли напруги перевищують межу плинності матеріалу. На даному етапі ступінь зв'язаності частинок значно зростає і підвищується температура суміші.

На третьому етапі відбувається в'язкий перебіг матеріалу. Напруження на цьому етапі перевищують межу плинності матеріалу.

На четвертому етапі відбувається продавлювання матеріалу через отвір фільтери. Виходячи з неї матеріал спучується за рахунок мікробухів водяної пари.

Для покращення ефективності процесу виробництва екструдованих кормів слід теоретичним шляхом обґрунтувати низку конструктивних параметрів робочих органів екструдера. Для розгляду процесу нагрівання матеріалу в екструдері представимо навивку шнека як двох паралельних пластин (рис.2.8).

Рух матеріалу відбувається зліва направо за рахунок дії з боку гребеня витка тиску. Роботу сили тертя для першої ділянки каналу можна уявити виразом:

$$A_1 = \int_0^{l_1} F_{\text{тр}} dx \quad (2.29)$$

Силу тертя можна виразити через тиск та площу

$$F_{\text{тр}} = P_x \mu S \quad (2.30)$$

Тиск першої ділянки шнека (до компресійного затвора) змінюється за довжиною каналу відповідно до залежності:

$$P_x = \frac{(P_{n1} - P_0)l}{l_1} \quad (2.31)$$

де l – довжина від початку каналу до елементарної ділянки dx Площа зіткнення суміші з валом визначається за такою формулою:

$$S = 2h_{\text{вх}} + l_{\text{вх}} \quad (2.32)$$

де $h_{\text{в}}$ – висота гребеня шнека;

x - шлях від початку каналу до елементарної ділянки dx ;

$l_{\text{в}}$ -відстань між сусідніми витками.

Використовуючи малюнок 2.8, висловимо x і dx .

$$x = l \sin/\alpha \quad (2.33)$$

$$dx = dl/\text{tg}\alpha \quad (2.34)$$

де α – кут подачі шнека, град.

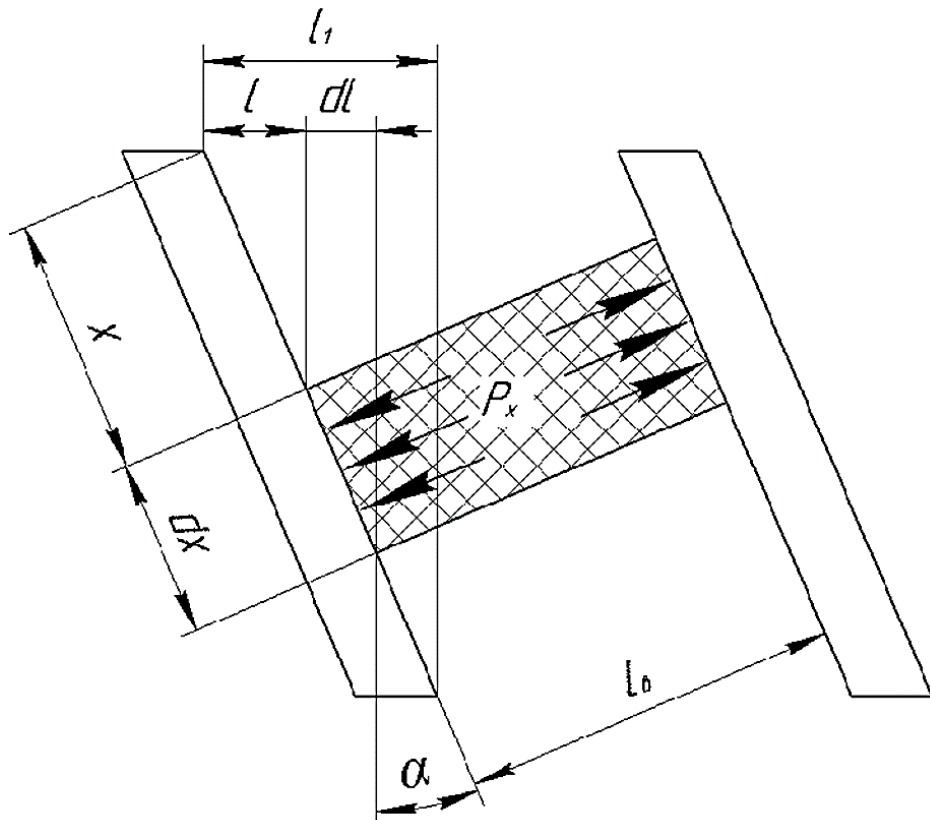


Рисунок 2.8 – Навивка шнека

Поставивши у вираз 21 рівняння 22-26, отримаємо:

$$A_1 = \int_0^{l_1} \frac{(P_{n1} - P_0) l \mu (2h_B + l_B)}{l_1 \sin \alpha \cdot \operatorname{tg} \alpha} dl \quad (2.35)$$

Проінтегрувавши вираз 26 отримаємо формулу для розрахунку роботи сили тертя для першої ділянки шнека.

$$A_1 = \frac{l_1^2 \mu (2h_{B1} + l_{B1}) (2P_{n1} + P_0)}{6 \sin \alpha_1 \cdot \operatorname{tg} \alpha_1} \quad (2.36)$$

Аналогічним чином знайдемо роботи сили тертя для другої та третьої ділянок шнеку.

$$A_2 = \frac{l_2^2 \mu (2h_{B2} + l_{B2}) (2P_{n2} + P_{K1})}{3 \sin \alpha_2 \cdot \operatorname{tg} \alpha_2} \quad (2.37)$$

$$A_3 = \frac{l_3^2 \mu (2h_{B3} + l_{B3}) (2P_{n3} + P_{K2})}{3 \sin \alpha_3 \cdot \operatorname{tg} \alpha_3} \quad (2.38)$$

де $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ – кут подачі на першому, другому та третьому шнеку відповідно, град;

$h_{B1}; h_{B2}; h_{B3}$ – висота гребеня шнека на першому, другому та третьому шнеку відповідно, м;

$l_{B1}; l_{B2}; l_{B3}$ – відстань між сусідніми витками на перше, другому та третьому шнеку відповідно, м;

$P_0; P_{K1}; P_{K2}$ – тиск на початку першої, другої та третьої ділянки шнека відповідно, Па;

$P_{n1}; P_{n2}; P_{n3}$ – тиск наприкінці першої, другої та третьої ділянки шнека відповідно, Па.

Сумарна робота сили тертя знаходиться шляхом складання сили тертя на кожній ділянці шнека.

$$\sum A = A_1 + A_2 + A_3 \quad (2.39)$$

Підставивши у вираз 2.39 вирази 2.36-2.38 отримаємо вираз для розрахунку роботи сили тертя на всьому шнеку екструдера.

$$\begin{aligned} \sum A = & \frac{l_1^2 \mu (2h_{B1} + l_{B1})(2P_{n1} + P_0)}{6 \sin \alpha_1 \cdot \operatorname{tg} \alpha_1} + \frac{l_2^2 \mu (2h_{B2} + l_{B2})(2P_{n2} + P_{K1})}{3 \sin \alpha_2 \cdot \operatorname{tg} \alpha_2} + \\ & + \frac{l_3^2 \mu (2h_{B3} + l_{B3})(2P_{n3} + P_{K2})}{3 \sin \alpha_3 \cdot \operatorname{tg} \alpha_3}; \end{aligned} \quad (2.40)$$

Розділимо роботу тертя на масу суміші, що входить в зону, для отримання формули розрахунку зміни температури суміші

$$\Delta Q = \sum A / \sum M \cdot c \quad (2.41)$$

де $\sum M$ – маса суміші, розташована у витках шнека, кг;

c - питома теплоємність, Дж/кгК.

Сумарну масу суміші, розташованої у витках, розрахуємо за формулою:

$$\sum M = M_1 + M_2 + M_3 \quad (2.42)$$

де M_1 ; M_2 ; M_3 – маса суміші на першому, другому та третьому шнеку відповідно. Розрахунок маси суміші, що знаходиться у витках шнека зробимо за формулою:

$$M = \rho v z \quad (2.43)$$

де ρ – щільність суміші кг/м³;

v - обсяг суміші в одному витку, м³;

z – кількість витків на валу.

Для визначення обсягу суміші в одному витку розглянемо схему рис. 2.9. За цією схемою виведемо формулу для розрахунку обсягу у міжвитковому простір для двозахідного шнека:

$$v = T\pi(r_{\text{вн}}^2 - r_{\text{к}}^2) - 2\delta_{\text{в}}(r_{\text{вн}} - r_{\text{к}}) T \sqrt{1 + \text{ctg}^2\alpha} \quad (2.43)$$

де $r_{\text{вн}}$ - зовнішній радіус зуба шнека, м;

$r_{\text{к}}$ - радіус канавки шнека, м;

T - крок витка, м;

$\delta_{\text{в}}$ – ширина витка, м.

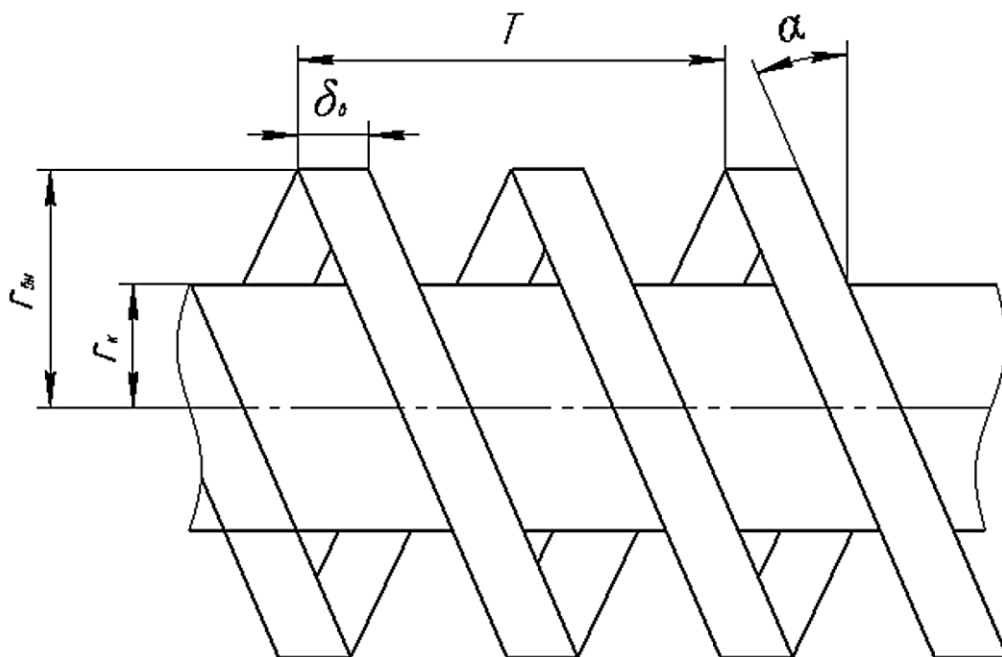


Рисунок 2.9 – Шнек екструдера

Радіус канавки шнека можна виразити через зовнішній радіус зуба шнека $r_{\text{вн}}$ та висоту гребеня витка шнека $h_{\text{в}}$:

$$r_k = r_{\text{вн}} - h_{\text{в}} \quad (2.44)$$

Підставивши вираз 2.44 до рівняння 2.43 та зробивши необхідні перетворення отримаємо

$$v = T\pi(2h_{\text{в}}r_{\text{вн}} - h_{\text{в}}^2) - 2\delta_{\text{в}}h_{\text{в}}T\sqrt{1 + ctg^2\alpha} \quad (2.45)$$

Число витків на валу можна обчислити через довжину ділянки шнека l і крок шнека T :

$$z = l/T \quad (2.46)$$

Підставивши в рівняння 2.42 рівняння 2.45 та 2.46 отримаємо формулу для розрахунку маси суміші на першій, другій та третій ділянках шнека екструдера:

$$M_1 = \rho \frac{l_1}{T_1} (T_1\pi(2h_{\text{в1}}r_{\text{вн1}} - h_{\text{в1}}^2) - 2\delta_{\text{в1}}h_{\text{в1}}T_1\sqrt{1 + ctg^2\alpha_1}) \quad (2.47)$$

$$M_2 = \rho \frac{l_2}{T_2} (T_2\pi(2h_{\text{в2}}r_{\text{вн2}} - h_{\text{в2}}^2) - 2\delta_{\text{в2}}h_{\text{в2}}T_2\sqrt{1 + ctg^2\alpha_2}) \quad (2.48)$$

$$M_3 = \rho \frac{l_3}{T_3} (T_3\pi(2h_{\text{в3}}r_{\text{вн3}} - h_{\text{в3}}^2) - 2\delta_{\text{в3}}h_{\text{в3}}T_3\sqrt{1 + ctg^2\alpha_3}) \quad (2.49)$$

де $T_1; T_2; T_3$ – крок першої, другої та третьої ділянки шнека екструдера відповідно, м;

$r_{\text{вн1}}; r_{\text{вн2}}; r_{\text{вн3}}$ – зовнішній радіус зуба шнека першого, другого та третього ділянки шнека відповідно, м;

$\delta_{\text{в1}}; \delta_{\text{в2}}; \delta_{\text{в3}}$ – ширина зуба шнека першої, другої та третьої ділянки шнека

відповідно, м.

Підставивши у формулу 2.42 формули 2.47-2.49 та зробивши необхідні перетворення отримаємо рівняння для розрахунку сумарної маси суміші, розташованої у витках шнека.

$$\begin{aligned} \sum M = \rho & \left(\frac{l_1}{T_1} \left(T_1 \pi (2h_{B1} r_{BH1} - h_{B1}^2) - 2\delta_{B1} h_{B1} T_1 \sqrt{1 + ctg^2 \alpha_1} \right) \right. \\ & + \frac{l_1}{T_2} \left(T_2 \pi (2h_{B2} r_{BH2} - h_{B2}^2) - 2\delta_{B2} h_{B2} T_2 \sqrt{1 + ctg^2 \alpha_2} \right) + \\ & \left. + \frac{l_1}{T_2} \left(T_2 \pi (2h_{B2} r_{BH2} - h_{B2}^2) - 2\delta_{B2} h_{B2} T_2 \sqrt{1 + ctg^2 \alpha_2} \right) \right) \end{aligned} \quad (2.50)$$

На значення температури обробки суміші істотно впливає тиск у екструдері. Зміну тиску можна здійснити за рахунок зміни довжини компресійних затворів та зміни площі вихідного отвору фільтери. Використовуючи формулу 2.41, побудуємо графік впливу зміни довжини компресійних кілець на температуру обробки зернового корму (рисунок 2.10) при кроці шнека $T_1 = T_2 = T_3 = 18$ мм; довжині шнека $l_1 = 60$ мм; $l_2 = l_3 = 35$ мм; тиск випресовування перед фільтерою $P_{\Pi} = 0,92$ МПа; зовнішнім радіусом зуба шнека $r_{BH1} = r_{BH2} = r_{BH3} = 18$ мм.

Аналізуючи дані графіка можна дійти невтїшного висновку, що з допомогою зміни довжини компресійного кільця можна суттєво змінювати температуру обробки кормів. Причому довжину компресійного кільця можна змінювати в процесі експлуатації екструдера без істотної обробки конструкції. При проектуванні екструдера найбільш доцільно підібрати довжину компресійних затворів, при яких забезпечуватиметься необхідна температура обробки.

Використовуючи формулу 2.41, побудуємо графік впливу зміни площі прохідного перерізу фільтери $S_{отв}$ на температуру обробки зернового корму (рисунок 2.11) при кроці шнека $T_1 = T_2 = T_3 = 18$ мм; довжині шнека $l_1 = 60$ мм; $l_2 = l_3 = 35$ мм; тиск перед фільтерою $P_{\Pi} = 0,93$ МПа; зовнішнім радіусом зуба шнека $r_{BH1} = r_{BH2} = r_{BH3} = 18$ мм., довжині компресійних кілець $l_1 = l_2 = 8$ мм.

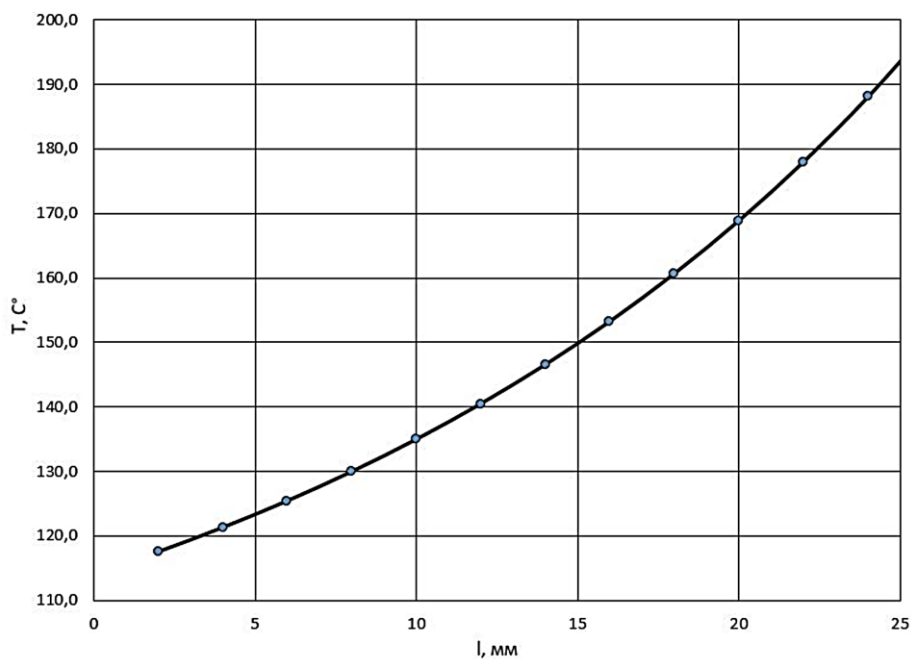


Рисунок 2.10 – Зміна температури обробки суміші від довжини компресійного кільця

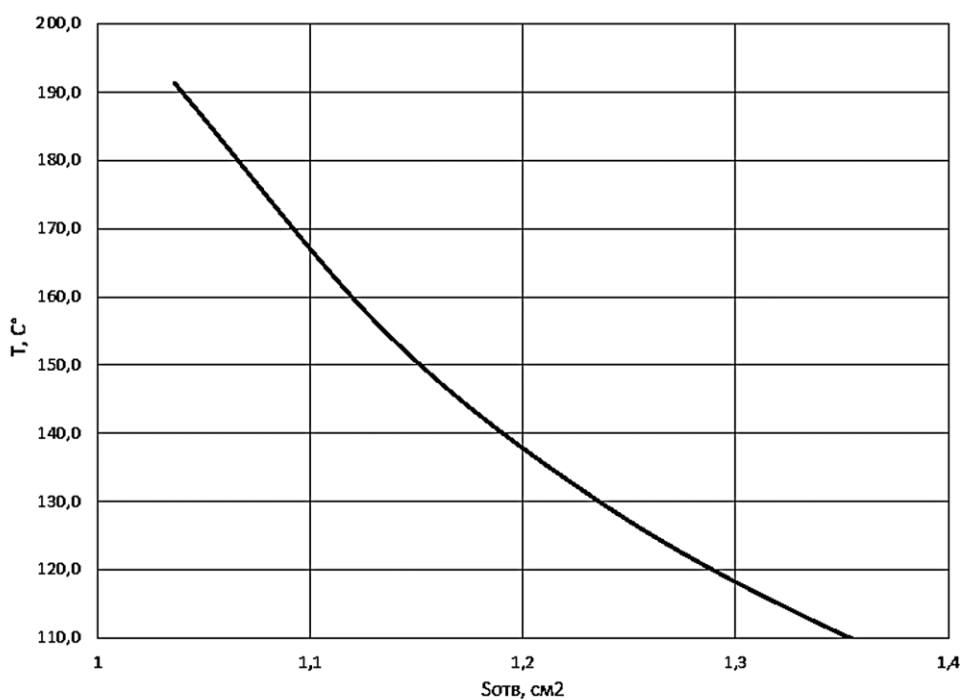


Рисунок 2.11 – Зміна температури обробки суміші від площі прохідного перерізу фільтри

На отриманому графіку видно, що збільшення площі прохідного перерізу фільтри призводить до зменшення температури обробки суміші. В процесі ек-

платуації за рахунок зміни прохідного перерізу фільтери можна коригувати температурний режим залежно від оброблюваного матеріалу, проте слід врахувати, що таке регулювання позначається на продуктивність екструдера.

Для розрахунку потужності, що витрачається на нагрівання розділимо роботу на час проходження суміші через шнек.

$$N = \sum A \omega / 2\pi z \quad (2.51)$$

де ω - кутова швидкість обертання шнека екструдера, с^{-1} .

В результаті проведених теоретичних досліджень отримано рівняння 2.41 для розрахунку температури обробки екструдера. Встановлено, що на температуру обробки суміші найбільше впливають довжина компресійних кілець та площа прохідного перерізу фільтери.

2.3 Висновки по розділу

В результаті теоретичних досліджень отримано математичну модель процесу обробки зернового корму в екструдері. Теоретично обґрунтовано конструктивні та технологічні параметри екструдера для виробництва зернового корму.

Отримано рівняння, що дозволяють у будь-якій точці екструдера визначити тиск (2.10; 2.25, 2.26; 2.27). Визначено фактори, що найбільше впливають на тиск у екструдері. Здійснено розрахунок зміни тиску в екструдері з конічними компресійними кільцями та без них. Обґрунтовано застосування конічних компресійних кілець.

Отримано рівняння для розрахунку температури обробки суміші, продуктивності екструдера, потужності, що витрачається на процес екструдювання, питомих витрат енергії. Визначено конструктивні та технологічні параметри екструдера, впливають на температуру обробки суміші, продуктивності екструдера та питомих витрат енергії.

3 Експериментальні дослідження лабораторного зразка екструдера

3.1 Мета і задачі досліджень

Для перевірки отриманих математичних залежностей проводилось експериментальне дослідження процесу екструдювання зернової кормової суміші. Дослідження проводились на спеціально розробленій лабораторній установці, за основу якої було взято прес-екструдера ЕГК-100. Для забезпечення послідовності проведення роботи з експериментального дослідження процесу розроблено програму експериментальних досліджень.

На першому етапі стоїть необхідність розробки програми та методики, яка дозволить провести експеримент з мінімальними витратами часу та ресурсів. Для чого слід зробити вибір незалежних та залежних величин, що підлягають дослідженню; вибір якісних та кількісних рівнів, вибраних факторів, а також побудова математичної моделі процесу екструдювання зернової суміші.

На другому етапі потрібно розробити експериментальну установку для дослідження процесу екструдювання зернової суміші та обрати вимірювальні прилади щодо експерименту. Провести експеримент згідно складеної методики випробувань та математично обробити отримані дані. На третьому етапі здійснити узагальнення результатів двох етапів; розрахувати економічний ефект від застосування даного пристрою у технології виробництва кормів.

Наведені етапи експериментального вивчення процесу екструдювання зернової суміші нерозривно пов'язані з підготовчою та теоретичною частиною роботи. Використовуючи методики випробування та теоретичні розрахунки, запропоновано програма експериментальних досліджень:

1. Здійснити пошукові експерименти;
2. Вивчити вплив конструктивних та технологічних параметрів робочого органу екструдера на процес екструдювання корму.

3. Вивчити вплив конструктивних та технологічних параметрів екструдера на якісні показники екструдера;
4. Вивчити роботу екструдера з метою розробки рекомендацій щодо вибору конструктивних та технологічних параметрів робочого органу екструдера.

3.2 Опис експериментальної установки

Установка складається з рами, на якій встановлено робочий орган екструдера з бункером. Привід робочих органів здійснюється від електродвигуна через черв'ячний редуктор. Для дозування з бункера в робочу частину екструдера в конструкції був застосований дозатор, що працює за рахунок зворотно-поступального руху лотка. Частота коливань дозатора залежить від швидкості обертання валу екструдера за рахунок передачі зусилля на штовхач дозатора через ексцентричний ролик.

Регулювання подачі зернової суміші в робочий орган екструдера здійснюється за рахунок зміни площі прохідного перерізу отвору, що з'єднує бункер та дозатор, що регулюється поворотом бункера.



Рисунок 3.1 – Загальний вигляд екструдера

Робоча частина екструдера (рисунок 3.2) складається з обертових від електродвигуна деталей: вал екструдера 1, що подає шнек 5, конічні компресійні кільця 6, шнек зони нагрівання 7, шнек зони пресування 8, і нерухомих деталей: корпус зони живлення 2, гайка фільтера 3, корпус зони екструдуювання 4.

Технологічний процес здійснюється в такий спосіб (рисунок 3.3.): суміш з бункера машини дозовано подається на шнек, що подає. 5, звідки транспортується до першого компресійного кільця 6 корм за рахунок сил тертя розігрівається, подрібнюється та стискається.

Компресійне кільце забезпечує звуження зазору між обертовими і нерухомими елементами робочої частини екструдера, що забезпечує збільшення тиску, що чиниться на перероблювану суміш, покращуючи її переробку. Аналогічно матеріал, що переробляється, проходить через друге компресійне кільце 6, шнек 7 і 8. Потім суміш подається до фільтера 3, звідки через регульований зазор залишає екструдер. Завдяки можливості регулювання зазору між фільтерою 3 і шнеком 8 змінюється тиск, надається на суміш усередині машини.

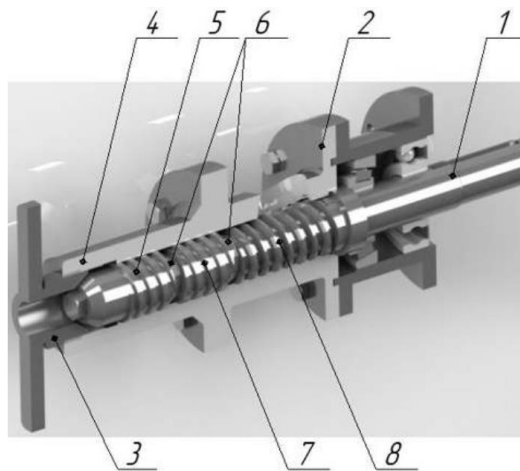


Рисунок 3.2 – Робоча частина екструдера: 1 – вал екструдера; 2 – корпус зони живлення; 3 – гайка фільтера; 4 – корпус зони екструдуювання. 5 - шнек, що подає; 6 – конічні компресійні кільця; 7 – шнек зони нагрівання; 8 – шнек зони пресування

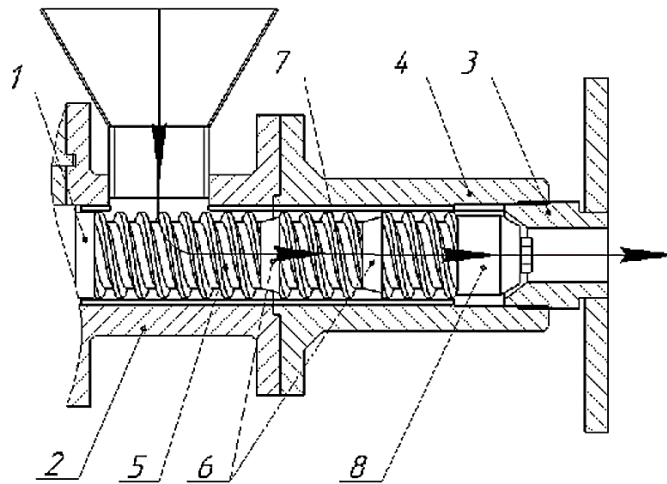


Рисунок 3.3 – Технологічний процес екструдювання

3.3 Результати експериментальних досліджень

В результаті багатofакторного регресійного аналізу, виконаного на основі результатів досліджень, встановлена залежність продуктивності Q , кг/год від наступних факторів: частоти обертання валу екструдера n , об/хв (b_1); довжини компресійних кілець h , мм (b_2); кроку шнека транспортної зони t , мм (b_3).

Після проведення повторного багатofакторного регресійного аналізу без урахування незначних ефектів, отримано рівняння регресії:

$$Q = -144,02 - 0,33 \cdot b_1 + 14,54 \cdot b_2 + 18,43 \cdot b_3 + 0,02 \cdot b_1 \cdot b_3 - 0,73 \cdot b_2 \cdot b_3 + 0,20 b_2 - 0,48 \cdot b_3 \quad (3.1)$$

З представлених даних можна дійти невтішного висновку, що модель (3.1) інформаційно здатна, так як коефіцієнт детермінації параметрів достатньо великий R^2 і дорівнює 99,81. Виявлено статистично достовірні (значущі) відмінності лише на рівні $\alpha=0,05$. Помітної кореляції між даними немає, оскільки статистика Durbin-Watson (DW) більша, ніж 1,4. Таким чином, в ході експерименту було отримано повну квадратичну модель, адекватно апроксимує результати експерименту на рівні значущості $\alpha=0,05$.

Поверхня відгуку, залежності продуктивності екструдера від частоти обертання валу екструдера та кроку шнека транспортної зони, побудовані на основі регресійного аналізу представлена на малюнку 3.4 (а).

Поверхня відгуку, залежності продуктивності екструдера від кроку шнека транспортної зони та довжини компресійного кільця, побудовані на основі регресійного аналізу представлена на малюнку 3.5 (б).

Аналізуючи поверхню відгуку, можна дійти невтішного висновку, що найбільше вплив на продуктивність екструдера робить крок шнека та частота обертання. Збільшення довжини компресійного кільця трохи зменшує продуктивність екструдера за рахунок збільшення протитечії оброблюваного матеріалу.

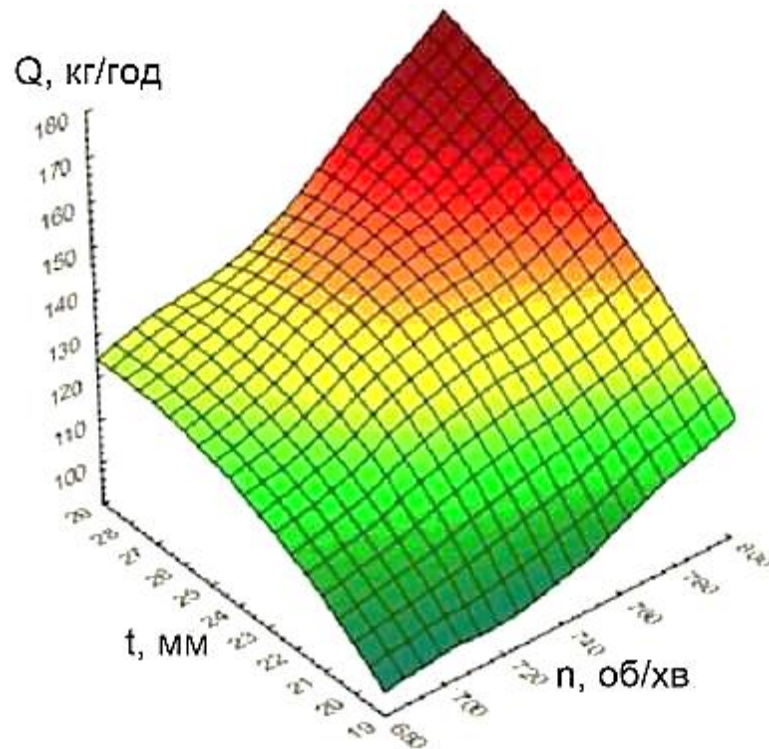


Рисунок 3.4 – Залежність продуктивності від частоти обертання валу та кроку шнека

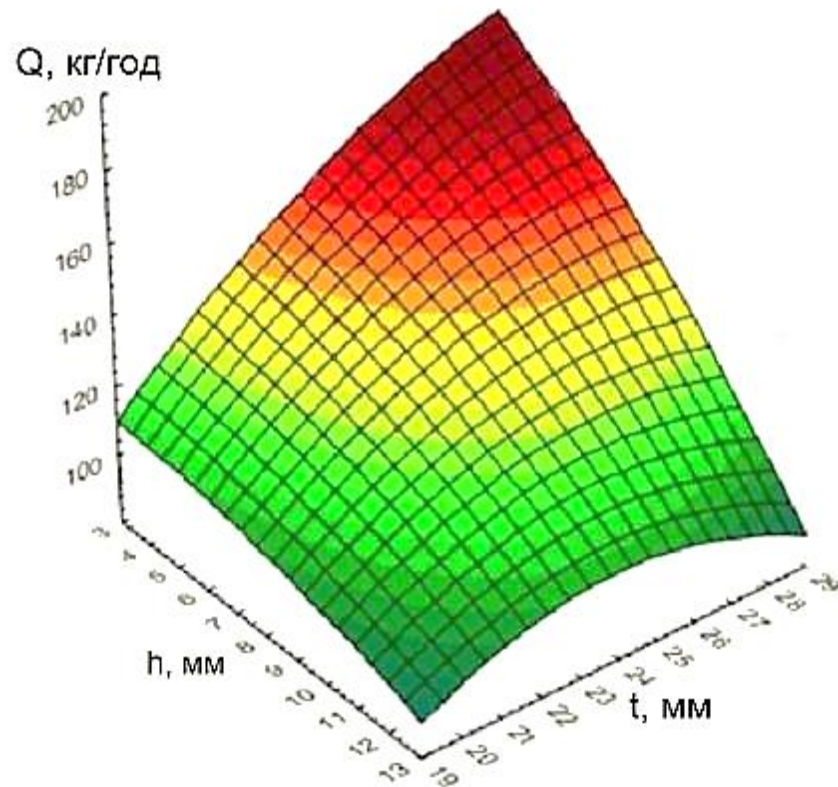


Рисунок 3.5 – Залежність продуктивності від кроку шнека та довжини кілця

Збільшення кроку шнека призводить до підвищення продуктивності. Збільшення частоти обертання валу екструдера збільшує продуктивність екструдера. У проведеному експерименті продуктивність екструдера при якій забезпечується необхідний температурний режим змінюється від 100 кг/год до 135 кг/год. Максимальна продуктивність $Q=135$ кг/год температурному режимі обробки суміші досягається за наступних конструктивних та технологічних параметрах екструдера: частоті обертання валу $n=735$ хв⁻¹; довжині компресійних кілець $l = 8$ мм; кроці шнека транспортної зони $T = 24$ мм.

В результаті багатофакторного регресійного аналізу, виконаного на основі результатів досліджень, встановлена залежність потужності, витрачається на процес екструдювання N , кВт від наступних факторів: частоти обертання валу екструдера n , об/хв (b_1); довжини компресійних кілець h , мм (b_2); кроку

шнека транспортної зони t , мм (b_3). Після проведення повторного багатофакторного регресійного аналізу без урахування незначних ефектів, отримано рівняння регресії:

$$N = 3,35687 - 0,01 \cdot b_1 + 0,02 \cdot b_2 - 0,05 \cdot b_3 + 0,01 \cdot b_2 + 0,01 \cdot b_3 \quad (3.2)$$

З даних можна зробити висновок, що модель (3.2) інформаційно здатна, т.к. коефіцієнт детермінації параметрів достатньо Великий R^2 і дорівнює 99,82%. Виявлено статистично достовірні (значущі) відмінності лише на рівні $\alpha=0,05$. Помітної кореляції між досвідченими даними немає, оскільки статистика Durbin-Watson (DW) більша, ніж 1,4. Таким чином, в ході експерименту було отримано повну квадратичну модель, адекватно апроксимує результати експерименту на рівні значущості $\alpha=0,05$.

Поверхня відгуку, залежності потужності, що витрачається на процес екструдювання від довжини компресійного кільця та частоти обертання вала екструдера, побудовані на основі регресійного аналізу представлена на малюнку 3.6.

Поверхня відгуку, залежності потужності, що витрачається на процес екструдювання, від частоти обертання валу екструдера та кроку шнека транспортної зони, побудовані на основі регресійного аналізу зображена на малюнку 3.7.

Аналізуючи поверхню відгуку, можна дійти невтішного висновку, що у потужність, витрачається на екструдювання впливають усі три змінюваних фактори. Збільшення довжини компресійного кільця збільшує потужність. Збільшення кроку шнека призводить до незначного зменшення потужності за рахунок зменшення температури обробки суміші.

При збільшенні частоти обертання валу екструдера витрачається потужність збільшується. У проведеному експерименті споживана потужність екструдювання при оптимальному температурному діапазоні змінюється від 19,4 кВт до 2,53 кВт.

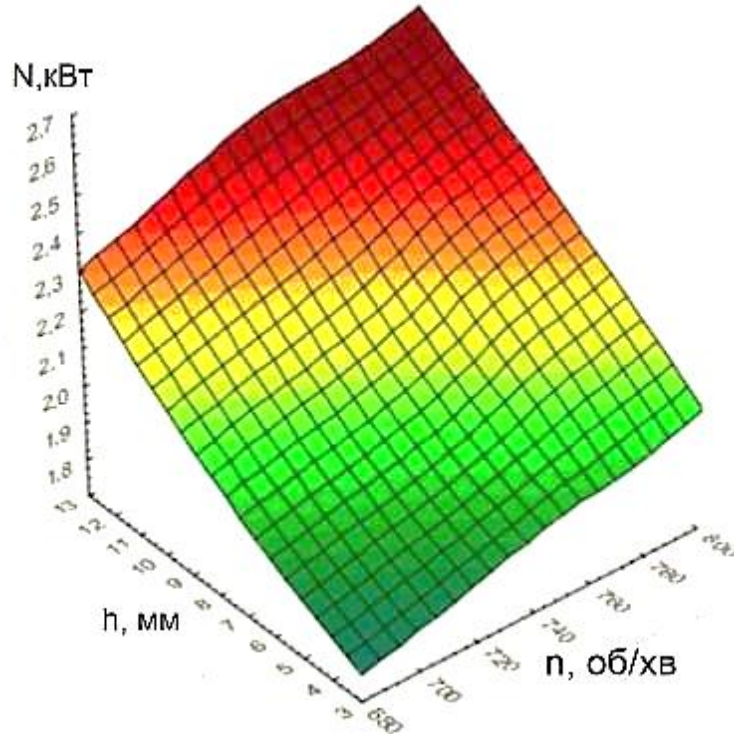


Рисунок 3.6 – Залежність потужності від довжини кільця та частоти обертання

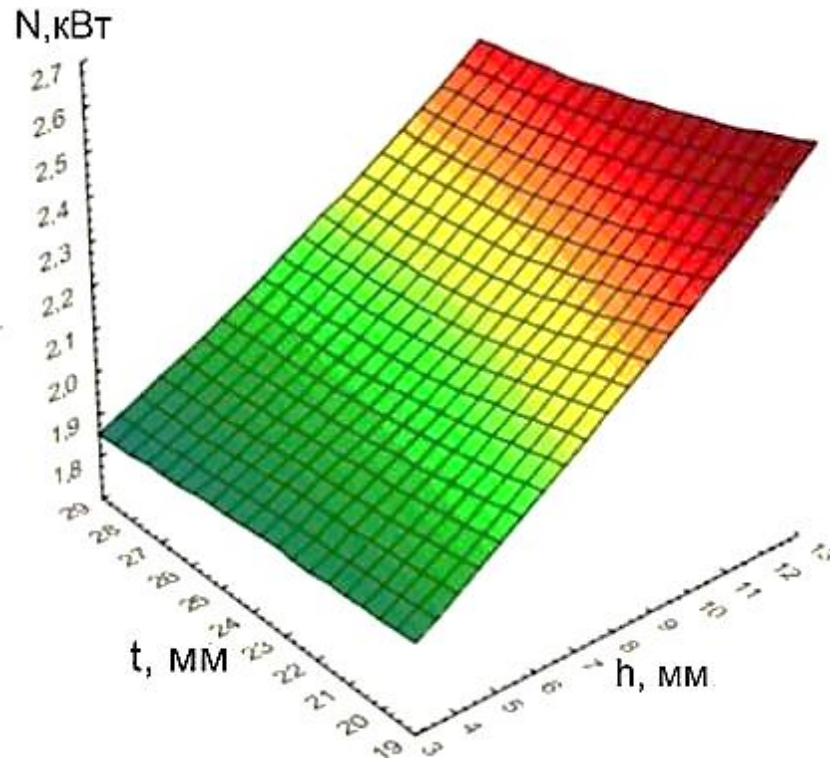


Рисунок 3.7 – Залежність потужності від кроку шнека та довжини кільця

Для визначення оптимальної температури, за якої забезпечується найкраща якість корму було проведено хімічний аналіз екструдату отриманого при температурі обробки від 100°C до 140°C. В результаті визначено, що за температури обробки 120 °C корм має найбільшу обмінну енергію. Хімічний аналіз встановив, що за даної температури обмінна енергія для свиней становить 10,8 МДж/кг, для ВРХ 10,7 МДж/кг для птиці 11,9 МДж/кг. Також зазначено, що за температури 120 °C і спостерігається зниження важкозасвоюваного крохмалю з 44,2% до 39,7% за рахунок переходу в легкозасвоюваний цукор вміст у кормі якого збільшився з 2,3% до 6,5%.

Встановлено що найбільш оптимальні параметри роботи екструдера при яких відзначається найкраща якість корму та найменші енерговитрати 19,4 кВт·год/т на одиницю обробленого корму, спостерігалася при частоті обертання валу $n=785 \text{ хв}^{-1}$; довжині компресійних кілець $l = 8 \text{ мм}$; кроці шнека транспортної зони $T=20 \text{ мм}$, $Q=121,4 \text{ кг/год}$; $N = 2,34 \text{ кВт}$; $T = 120,9 \text{ °C}$.

3.4 Висновки по розділу

Проведений багатofакторний експеримент підтвердив працездатність одержаних теоретичним шляхом математичних моделей. Внаслідок хімічного аналізу екструдованої пшениці встановлено збільшення обмінної енергії порівняно з необробленою пшеницею та покращення засвоюваності корму за рахунок переходу крохмалю в цукор.

Встановлено оптимальна температура обробки 120 °C, при якій спостерігається найкраща засвоюваність за рахунок переходу крохмалю, що важко засвоюється, в легкозасвоюваний цукор вміст у кормі якого збільшився з 2,3% до 6,5%. та найбільша обмінна енергія для свиней 10,8 МДж/кг, для ВРХ 10,7 МДж/кг для птиці 11,9 МДж/кг.

Встановлено що найбільш оптимальні параметри роботи екструдера при яких відзначається найкраща якість корму та найменші енерговитрати 19,4

кВт·год/т на одиницю обробленого корму, спостерігалася при частоті обертання валу $n=785 \text{ хв}^{-1}$; довжині компресійних кілець $l = 8 \text{ мм}$; кроці шнека транспортної зони $T=20 \text{ мм}$, $Q=121,4 \text{ кг/год}$; $N = 2,34 \text{ кВт}$; $T = 120,9 \text{ }^\circ\text{C}$.

4 Охорона праці

4.1 Загальні вимоги

Загальні вимоги з охорони праці при приготуванні комбікормів в Україні регулюються рядом нормативно-правових документів. На даний момент основними законами та нормативами є:

Закон України «Про охорону праці визначає основні принципи та вимоги забезпечення безпеки та охорони праці на робочому місці.

Санітарні норми та правила (СНіП 2Охорона праці в сільському господарстві»), цей документ містить конкретні вимоги до охорони праці в аграрному секторі, включаючи виробництво комбікормів.

Гігієнічні нормативи (ГН «Гігієнічні вимоги до виробництва, реалізації та застосування кормів»), регулює гігієнічні вимоги до виробництва та застосування кормів, включаючи комбікорми.

Наказ Міністерства охорони здоров'я України «Про затвердження Переліку професій, робота на яких вважається шкідливою для здоров'я», визначає категорії робіт, які можуть мати негативний вплив на здоров'я працівників у виробництві комбікормів.

Нормативні акти щодо безпеки харчових продуктів. Оскільки комбікорми призначені для тваринної годівлі, також важливо враховувати вимоги до безпеки харчових продуктів, які можуть впливати на якість м'яса, молока та інших тваринних продуктів.

Праця з мінікомбікормовими установками та агрегатами повинна відповідати вимогам охорони праці для забезпечення безпеки та здоров'я працівників. Основні вимоги можуть включати:

Організація робочого місця. Забезпечення вільного доступу до робочих місць та обладнання. Використання протизсувних покриттів на підлозі для уникнення травматичних ситуацій. Зону навколо установок повинно бути відзначено інформаційними знаками та лініями безпеки.

Освітлення. Забезпечення достатнього освітлення на робочих ділянках. Використання світлодіодних джерел для уникнення блисків та тіней.

Електробезпека. Регулярна перевірка електрообладнання на відповідність стандартам. Встановлення захисних пристроїв та відключення живлення при обслуговуванні та ремонті.

Захист від шуму та вібрації. Забезпечення працівників засобами індивідуального захисту від шуму та вібрації. Регулярна перевірка рівня шуму та вібрації та при необхідності застосування заходів зменшення їх впливу.

Вентиляція та охорона дихальних шляхів. Забезпечення ефективної системи вентиляції для зменшення концентрації шкідливих речовин у повітрі. Надання працівникам засобів індивідуального захисту дихальних шляхів при необхідності.

Навчання та інструктажі. Проведення навчання та інструктажів з питань охорони праці для всіх працівників, які працюють з мінікомбікормовими установками та агрегатами. Забезпечення працівників знаннями щодо користування засобами індивідуального захисту.

Аварійна безпека. Встановлення систем аварійного відключення та надання персоналу інструкцій щодо дій в разі аварії. Проведення регулярних навчань та тренувань з ведення аварійних ситуацій.

Медичне обстеження. Проведення регулярних медичних оглядів працівників, які працюють з мінікомбікормовими установками.

Ці вимоги можуть бути доповнені або змінені відповідно до конкретних умов роботи та вимог законодавства охорони праці в Україні.

4.2 Розробка проекту інструкції з охорони праці при роботі з екструдером зернових кормів

1. Загальні положення:

Мета інструкції - забезпечення безпеки та охорони здоров'я працівників

при використанні екструдера зернових кормів.

Відповідальність за впровадження інструкції покладається на відповідальних керівників і операторів.

2. Загальні вимоги:

Заборонено працювати з екструдером без відповідного навчання та допуску.

Здійснюйте періодичну перевірку стану обладнання перед початком роботи.

3. Основні правила безпеки:

Використовуйте особисті засоби захисту: захисні окуляри, рукавиці, відповідний одяг.

Дотримуйтесь інструкцій і правил експлуатації, поданих в технічній документації екструдера.

Заборонено обходити або видаляти захисні пристрої.

4. Процедури в разі виникнення небезпеки:

Негайно припиніть роботу та вимкніть екструдер у випадку будь-яких відхилень від нормальної роботи. Повідомте відповідних керівників та відділ безпеки.

5. Правила експлуатації:

Дотримуйтеся рекомендацій щодо налаштування та роботи з екструдером.

Використовуйте лише рекомендовані матеріали та компоненти.

6. Навчання та інструктажі:

Забезпечте регулярне навчання та інструктажі для працівників, які працюють з екструдером.

Проводьте тренування з екстрених ситуацій.

7. Контроль та аудит безпеки:

Введіть систему періодичного контролю за станом обладнання та виконанням правил безпеки. Проводьте аудити щодо відповідності інструкції та

вживайте заходів для усунення виявлених недоліків.

Ця інструкція повинна бути доступною всім працівникам та регулярно оновлюватися для відображення будь-яких змін у процесі роботи чи вимогах безпеки.

4.3 Порядок дій у надзвичайних ситуаціях

Ситуація небезпеки ракетного обстрілу вимагає від людей особливої уваги та обачливості. Нижче подані загальні рекомендації щодо правил поведінки в таких умовах:

Швидко знаходьте укриття. Можливості негайного укриття можуть включати бомбосховища, підземні приміщення або будь-яке інше місце, що може захистити вас від потенційної небезпеки.

Не залишайтеся на відкритому просторі. Уникайте відкритих місць, таких як поля, парки чи вулиці без притулку. Ракети можуть бути спрямовані на великі відкриті площі.

Використовуйте пристосування для захисту. Якщо ви не можете знайти укриття, шукайте захист під твердими об'єктами, які можуть служити природнім відкритими просторами.

Визначте плани евакуації. Заздалегідь вивчіть маршрути евакуації та місця укриття в вашому районі. Знання планів може бути вирішальним у ситуації небезпеки.

Слідкуйте за попередженнями та інструкціями. Слухайте радіо, телебачення чи інші джерела інформації для отримання актуальних попереджень та інструкцій від влади.

Забезпечте себе продуктами та водою. Майте запас продуктів та води для

можливих періодів, коли ви можливо залишитесь в укритті.

Приховуйтеся від вікон та дверей. В укритті уникайте використання вікон та дверей, оскільки вони можуть бути джерелом травм та пошкоджень.

Зберігайте засоби першої допомоги. Матеріали для першої допомоги можуть бути корисними у разі отримання поранень.

Зберігайте спокій. Зберігайте спокій та допомагайте іншим. Займіться психологічною підтримкою для тих, хто може бути в стані стресу.

Використовуйте телефон розсудливо. Використовуйте телефон лише для екстрених викликів та отримання необхідної інформації.

Важливо пам'ятати, що кожна ситуація може вимагати індивідуального підходу, і слід дотримуватися інструкцій влади та рятувальних служб.

4.4 Висновки по розділу

Робота на екструдері зерна є важливим процесом у виробництві кормів, і для забезпечення безпеки праці під час цього процесу слід дотримуватися конкретних заходів та порядку дій. Вище подано загальний порядок безпечної роботи при екструдюванні зернових кормів, а також порядок дій у випадку надзвичайних ситуацій.

5 Економічна оцінка

В даному розділі ми будемо оцінювати економічну ефективність використання розробленого екструдера зернових кормів. Для порівняння економічних показників розробленого та базового (ЕГК-100) екструдерів ми будемо враховувати експлуатаційні витрати.

Витрати на заробітну плату

$$Z = n \cdot t \cdot f \cdot \delta \cdot D, \text{ грн.}, \quad (5.1)$$

де n – чисельність обслуговуючого персоналу, люд.;

f – годинна тарифна ставка одного працівника, грн/год.;

t – тривалість роботи машини на добу, год.;

D – кількість робочих днів на рік;

δ – коефіцієнт нарахування на заробітну плату;

Добовий час роботи машини визначається виходячи з добової потреби в комбікормах.

$$t = \frac{G_{\text{доб}}}{Q_3} = \frac{n \cdot g}{Q_3}, \text{ год.}, \quad (5.2)$$

де $G_{\text{доб}}$ – добова потреба в комбікормах по фермі, кг;

Q_3 – продуктивність екструдера, кг/год.

n – поголів'я свиней на фермі, гол.;

g – добова потреба в комбікормі на голову, кг/гол.

Амортизаційні відрахування

$$A = \frac{B \cdot \alpha}{100}, \text{ грн.}, \quad (5.3)$$

де B – балансова вартість екструдера, грн.

α – коефіцієнт відрахувань на амортизацію, %.

Відрахування на ремонт і ТО екструдера

$$P = \frac{B \cdot \beta}{100}, \text{ грн.}, \quad (5.4)$$

де β – коефіцієнт відрахувань на ремонт та ТО, %.

Витрати на електроенергію визначимо за формулою

$$E = N \cdot t \cdot D \cdot c_e, \text{ грн.}, \quad (5.5)$$

де N – потужність екструдера, кВт.;

c_e – вартість електроенергії, грн/кВт·год.

Загальні витрати

$$EB = Z + A + P + E, \text{ грн.} \quad (5.6)$$

Економія витрат

$$EEB = EB_1 - EB_2, \text{ грн.} \quad (5.7)$$

де EB_1 , EB_2 – експлуатаційні витрати для базового та розробленого екструдера відповідно, грн.

Термін окупності нового екструдера

$$P = \frac{B_2 - B_1}{EEB}, \text{ грн.}, \quad (5.8)$$

де B_1, B_2 – балансова вартість базового та проектного екструдера, грн.

Вихідні дані та результати розрахунків приведено в табл. 5.1.

Таблиця 5.1 – Показники економічної ефективності екструдера

№ з.п.	Показник	ЕГК-100	Екструдер за розробкою
1	2	3	4
1	Чисельність обслуговуючого персоналу, люд.	1	1
2	Годинна тарифна ставка, грн/год.	120,6	120,6
3	Кількість робочих днів на рік	365	365
4	Поголівя свиней на приватній фермі, гол.	120	120
5	Добова потреба в кормі, кг/гол.	3,4	3,4
6	Добова потреба в кормі по фермі, кг	408	408
7	Продуктивність екструдера, кг/год	100	120
8	Тривалість роботи машини на добу, год.	4,08	3,40
9	Балансова вартість машини, грн.	38600	48600
10	Коефіцієнт відрахувань на амортизацію, %	10	10
11	Коефіцієнт відрахувань на ремонт і ТО, %	8	8
12	Вартість електроенергії, грн/кВт·год	2,64	2,64
13	Потужність на привід, кВт	4	2,7
14	Витрати на заробітну плату, грн.	219108,97	182590,81
15	Амортизаційні відрахування, грн.	3860,00	4860,00
16	Відрахування на ремонт і ТО, грн.	3088,00	3888,00
17	Витрати на електроенергію, грн.	15725,95	8845,85
18	Експлуатаційні витрати, грн.	241782,93	200184,66
19	Економія експлуатаційних витрат, грн.	-	41598,27
20	Термін окупності нового екструдера, років	-	0,24

Техніко-економічна оцінка експериментального екструдера показала, що в порівнянні з базовим він має переваги за експлуатаційними витратами за рахунок зменшення енергоємності та матеріалоємності. При вартості удосконалення 10000 грн. отримано економію експлуатаційних витрат на рівні 40000 грн, отже строк окупності при впровадженні складе 0,24 роки.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

В результаті аналізу видів кормів та способів їх приготування встановлено, що найбільш ефективним є корми, отримані енергоємними способами, що змінюють їх фізико-механічні та хімічні властивості. Найбільш перспективним технологічним рішенням є застосування екструдуювання, що підвищує засвоюваність кормів до 30%, знижує питому вартість та витрату в середньому до 25%. Однак екструдуювання є дуже енергоємним процесом, тому зменшення енергоємності є актуальним питанням.

В результаті теоретичних досліджень отримано математичну модель процесу обробки зернового корму в екструдері. Теоретично обґрунтовано конструктивні та технологічні параметри екструдера для виробництва зернового корму. Отримано рівняння, що дозволяють у будь-якій точці екструдера визначити тиск. Визначено фактори, що найбільше впливають на тиск у екструдері. Здійснено розрахунок зміни тиску в екструдері з конічними компресійними кільцями та без них. Обґрунтовано застосування конічних компресійних кілець.

Встановлено оптимальна температура обробки 120 °С, при якій спостерігається найкраща засвоюваність за рахунок переходу крохмалю, що важко засвоюється, в легкозасвоюваний цукор вміст у кормі якого збільшився з 2,3% до 6,5%. та найбільша обмінна енергія для свиней 10,8 МДж/кг, для ВРХ 10,7 МДж/кг для птиці 11,9 МДж/кг. Встановлено що найбільш оптимальні параметри роботи екструдера при яких відзначається найкраща якість корму та найменші енерговитрати 19,4 кВт·год/т на одиницю обробленого корму, спостерігалася при частоті обертання валу $n=785 \text{ хв}^{-1}$; довжині компресійних кілець $l = 8 \text{ мм}$; кроці шнека транспортної зони $T=20 \text{ мм}$, $Q=121,4 \text{ кг/год}$; $N = 2,34 \text{ кВт}$; $T = 120,9 \text{ °С}$.

Робота на екструдері зерна є важливим процесом у виробництві кормів, і для забезпечення безпеки праці під час цього процесу слід дотримуватися кон-

кретних заходів та порядку дій. Вище подано загальний порядок безпечної роботи при екструдюванні зернових кормів, а також порядок дій у випадку надзвичайних ситуацій.

Техніко-економічна оцінка експериментального екструдера показала, що в порівнянні з базовим він має переваги за експлуатаційними витратами за рахунок зменшення енергоємності та матеріалоємності. При вартості удосконалення 10000 грн. отримано економію експлуатаційних витрат на рівні 40000 грн, отже строк окупності при впровадженні складе 0,24 роки.

БІБЛІОГРАФІЯ

1. Єгоров, Б.В. Технологія виробництва комбікормів [Текст]: підруч. для вищ. навч. закладів/Б.В. Єгоров.–Одеса.: Друкарський дім, 2011.– 448 с.
2. Братішко В. В. Дослідження геометричних параметрів гвинта гранулятора кормів з основою каналу у вигляді частини кола / Вісник ХНТУСГ ім. П. Василенка. – Харків: ХНТУСГ ім. П. Василенка. 2013. Вип. №132. Технічні системи і технології тваринництва. С.415 – 420.
3. Братішко В. В. Аналіз продуктивності гвинтового гранулятора кормів зі змінними геометричними параметрами гвинта за його довжиною / Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин: загальнодержавний міжвід. наук.-тех. зб. Кіровоград: КНТУ 2013, Вип. 43, ч.ІІ. С. 43 – 49.
4. Братішко В. В. Науково-технічні основи приготування комбікормів гвинтовими грануляторами: монографія / Тернопіль: Видавництво «Крок», 2017. 234 с.
5. Гончар В. А., Каплун В. Г. Підвищення довговічності матеріального циліндра екструдера для переробки фуражного зерна з добавками сапоніту. / Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин: загальнодержавний міжвід. наук.-тех. зб. Кіровоград: КНТУ, 2010. Вип. 40, ч.1. С.169 – 173.
6. Дмитренко В. П. Установа для формування кормових брикетів / Міжнародна науково-технічна конференція молодих учених та студентів «Актуальні задачі сучасних технологій», 19 – 20 листопада 2014 р.: збірник тез допов. Тернопіль: ТНТУ, 2014. С. 96 – 97.
7. Дмитренко В. П., Гевко Б. М., Третьяков О. Л., Котик Р. М. Конструктивно-технологічна характеристика гвинтових деталей у машинобудуванні / Збірник наукових праць ВНАУ. Серія: Техніка, енергетика, транспорт АПК. Вінниця, 2016. Вип. 2(94). С. 63 – 67.

8. Єгоров Б. В. Науково-практичні основи технологічних процесів екструдуювання та експандування зерна і комбікормів / Технології, 2011. №7. С. 9 – 12.
9. Єгоров Б. В. Нові напрямки удосконалення та розвитку комбікормових технологій / Зернові продукти і комбікорми. 2011, №2 (42). С. 21 – 23.
10. Зносостійкість деталей екструдерів і термопластавтоматів в абразивному середовищі / Під загальною редакцією В. Г. Каплуна. ХНУ. 2014. 244 с.
11. Календрузь І., Бурилко А. А. Екструдери для зерна. Пропозиція. 2010, №12. С. 100 – 103.
12. Кондратюк Д. Г., Дмитренко В. П., Ляшук О. Л. Теоретичне обґрунтування конструкції пружинного гвинтового робочого органу екструдера. / Збірник наукових праць ВНАУ. Серія: Техніка, енергетика, транспорт АПК. Вінниця, 2017. Вип. 1(96). С. 100 – 103
13. Ловейкін В. С., Рогатинський О. А. Моделювання та керування навантаженням гвинтових конвеєрів / Праці I Міжнародної науково-технічної конференції «DSR AM – I». Тернопіль: 2004. С. 163 – 169.
14. Ляшук О. Л., Клендій В. М., Третьяков О. Л., Дмитренко В. П. Обґрунтування конструкції гвинтового робочого органу екструдера / Міжнародна науково-технічна конференція молодих учених та студентів «Актуальні задачі сучасних технологій», 25 – 26 листопада 2015 р.: збірник тез допов. Том 1. Тернопіль: ТНТУ, 2015. С. 171 – 173.
15. Ляшук О. Л., Третьяков О. Л., Дмитренко В. П., Колесник О. А. Технологічність конструкцій механізмів гвинтових робочих органів екструдерів / Сільськогосподарські машини: зб. наук. Статей. Луцьк, 2015. Вип. 33. С. 94 – 102.
16. Подвальна О. О., Шаран А. В. Екструдуювання нетрадиційної крохмалевмісної сировини / Молодий вчений. №1 (41), 2017. С. 59 – 62.
17. Стоцько З. А., Сокіл Б. І., Топільницький В. Г. Вплив конструкційних і кінематичних параметрів вібротришків на підвищення інтенсивності об'ємної

обробки / Всеукраїнський науково – технічний журнал Вібрації в техніці та технологіях. №4 (25). 2002. С. 46 – 52.

18. Стоцько З. А., Сокіл Б. І., Топільницький В. Г. Нелінійна модель руху шару середовища робочого контейнера вібраційної машини об'ємної обробки виробів зі змінним параметром не лінійності / Машинознавство. 2001. №1. С. 19 – 23.

19. Харченко Є. В., Сокіл М. Б. Нелінійні процеси у середовищах, які характеризуються поздовжнім рухом і вплив способу закріплення на їх коливання / Автоматизація виробничих процесів у машинобудуванні та приладобудуванні. – Львів, 2007. №41. С. 156 – 159.

20. Цуркан О. В., Кесарчук І. М. Комбінований вібраційний змішувач. Вібрації в техніці та технологіях. №1(53), 2009. С. 114 – 115.

21. Chen L. Q. Analysis and control of transverse vibrations of axially moving strings. Appl. Mech. Rev. 2005. Volume 58.2. P. 91–116.

22. Chen L. Q. Transverse vibrations of an axially accelerating viscoelastic string with geometric nonlinearity/ Journal of Engineering Mathematics 48, 2004. P. 171–182.

23. Extrusion-Cooking Techniques: Applications, Theory and Sustainability: [edited by Leszek Moscicki]. Weinheim: WILEY-VCH, 2011. 234 p.

24. Fellows P. J. Food Processing Technology. Principles and Practice / P. J. Fellows. Cambridge: CRC, Woodhead Publishing, 2002. 575 p.

25. Food Science and Technology: [edited by Geoffrey Campbell - Platt]. Singapore: John Wiley & Sons, Ltd., 2009. 520 p.

26. Grebaut I. Cuisson-extrusion des produits cerealiers. Industries des cereales. Франція, 1984. № 28. С. 7–12.

27. Miller R. Unit operations and equipment / Breakfast Cereals and How They Are Made. American Association of Cereal Chemist. St. Paul, MN. 1990. 145 p.

28. Oleg Lyashuk. Study on Nonlinear Model of Dynamics of a System „Extruder Elastic Auger Working Body“/ Oleg Lyashuk, Mariya Sokil, Volodymyr

Klendiý, Olena Skyba, Victor Dmytrenko // *Acta technologica agriculturae*. 2016. Num. 4. P. 101–106. Nitra. Slovak Republic. ISBN 1335-2555. (Scopus, AGRIS/FAO).

29. Rossen I. L., Miller R. C. Food Extrusion. / *Food technology*, CIHA, 1973. № 27. P. 46–53. 136. S.

30. Ponomareva. W.T. On applying the Laplace transform method to an equation describing an axially moving string. *Proc. Appl. Math. Mech.* 2004 № 4. P. 107–108.

31. Wan der Pol. A Teory of the Amplitude of Free and Forced Triode Vibrations. *Radio Review*. 1920. №1.