

Дніпровський державний аграрно-економічний університет
Інженерно-технологічний факультет
Кафедра інжинірингу технічних систем

Пояснювальна записка
до дипломної роботи
освітнього ступеня "Магістр" на тему:
**Обґрунтування конструктивно-режимних параметрів гвинтового
екструдера комбікормів для об'єктів аквакультури**

Виконав: студент 2 курсу, групи МгАІз-1-23
за спеціальністю 208 «Агроінженерія»

_____ Костромітінов Лев Вячеславович

Керівник: _____ Лупко Кристина Олегівна

Рецензент: _____ Луц Павло Михайлович

Дніпро, 2024

**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)

«12» листопада 2024 р.

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

Костромітінову Леву Вячеславовичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи: Обґрунтування конструктивно-режимних параметрів гвинтового екструдера комбікормів для об'єктів аквакультури

керівник роботи Лупко Кристина Олегівна, доктор філософії

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

затверджені наказом вищого навчального закладу від

«12» листопада 2024 року № 3784

2. Строк подання студентом роботи 16.12.2024 року

3. Вихідні дані до проекту Огляд стану питання в галузі аквакультури та існуючих технічних засобів приготування кормів. Патентний пошук, аналіз літературних джерел, останніх досліджень з обраної тематики.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити)

1. Стан питання процесу виробництва комбікормів для об'єктів аквакультури. 2. Теоретичні дослідження процесу екструзії комбікормів. 3. Методика експериментальних досліджень процесу екструзії комбікормів. 4. Результат експериментальних досліджень процесу екструзії комбікормів. 5. Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях. 6. Економічна ефективність двохшнекового екструдера. Висновки. Список використаних джерел. Додатки

5. Перелік демонстраційного матеріалу

1. Тема. Мета і задачі досліджень (2 аркуша, А4). 2. Стан і напрями досліджень (1 аркуш, А4). 3. Теоретичні дослідження (1 аркуш, А4). 4. Експериментальні дослідження (4 аркуша, 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
1-6	Лупко К. О., старший викладач	12.11.2024	09.12.2024
Нормоконтроль	Івлєв В. В., доцент	06.12.2024	09.12.2024

7. Дата видачі завдання: 12 листопада 2024 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломного проекту	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Аналітичний	до 14.11.2024 р	виконано
2	Теоретичний	до 21.11.2024 р	виконано
3	Експериментальний	до 28.11.2024 р	виконано
4	Охорона праці	до 02.12.2024 р	виконано
5	Економічний	до 06.12.2024 р	виконано
6	Демонстраційна частина	до 09.12.2024 р	виконано

Студент

_____ Костромітінов Л. В.

(підпис)

(прізвище та ініціали)

Керівник роботи

_____ Лупко К. О.

(підпис)

(прізвище та ініціали)

Костромітінов Л. В. Обґрунтування конструктивно-режимних параметрів гвинтового екструдера комбікормів для об'єктів аквакультури. Випускна кваліфікаційна робота на здобуття освітнього ступеня «Магістр» за спеціальністю 208 «Агроінженерія». ДДАЕУ, Дніпро, 2024.

Розглядаються ключові аспекти виробництва комбікормів для об'єктів аквакультури, зокрема їх якісні характеристики, конструктивні та технологічні рішення процесу гранулювання. У розділі 1 аналізуються вимоги до якості комбікормів, а також огляд теоретичних досліджень, що стосуються гранулювання, включаючи висновки. Розділ 2 присвячений теоретичним дослідженням процесу екструзії комбікормів, де визначаються продуктивність двошнекового екструдера, форма отворів матриці та номінальна потужність. Висновки з цього розділу узагальнюють основні результати. У розділі 3 представлено методичку експериментальних досліджень, що включає визначення кінетики деформації комбікормової суміші та дослідження гранулювання через отвори різних форм. Розділ 4 охоплює результати експериментальних досліджень, зокрема обробку даних, визначення продуктивності та енергоємності процесу, а також оцінку якості гранул. Окрему увагу приділено методиці інженерного розрахунку двошнекового екструдера. Розділ 5 присвячений охороні праці та безпеці в надзвичайних ситуаціях, а розділ 6 оцінює економічну ефективність двошнекового екструдера.

Ключові слова: комбікорми, аквакультура, якісні характеристики, гранулювання, екструзія, двошнековий екструдер, продуктивність, номінальна потужність, кінетика деформації, технологічний процес, енергоємність, оцінка якості, економічна ефективність.

Апробація. Костромітінов Л. В. (2024). Обґрунтування конструктивно-режимних параметрів гвинтового екструдера комбікормів для об'єктів аквакультури. Збірник тез III Всеукраїнської науково-практичної конференції молодих вчених «Інжиніринг технологій і технічних систем агропромислового комплексу» (15 листопада 2024 р.). Частина 1. Інжиніринг технічних систем агропромислового виробництва. Дніпро. ДДАЕУ, 158–160.

ЗМІСТ

1 СТАН ПИТАННЯ ПРОЦЕСУ ВИРОБНИЦТВА КОМБІКОРМІВ ДЛЯ ОБ'ЄКТІВ АКВАКУЛЬТУРИ	8
1.1 Якісні характеристики комбікормів для об'єктів аквакультури	8
1.2 Конструктивна та технологічна реалізація процесу гранулювання комбікормів	11
1.3 Огляд теоретичних досліджень процесу гранулювання комбікормів	19
1.4 Висновки з розділу	23
2 ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ЕКСТРУЗІЇ КОМБІКОРМІВ	25
2.1 Визначення продуктивності двошнекового екструдера	25
2.2 Визначення форми отворів матриці по її довжині	27
2.3 Визначення номінальної потужності екструдера	33
2.4 Висновки з розділу	35
3 МЕТОДИКА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ПРОЦЕСУ ЕКСТРУЗІЇ КОМБІКОРМІВ	36
3.1 Визначення кінетики деформації комбікормової суміші	36
3.2 Дослідження процесу гранулювання через отвори різної форми	40
3.3 Дослідження технологічного процесу екструзії	43
4 РЕЗУЛЬТАТ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ПРОЦЕСУ ЕКСТРУЗІЇ КОМБІКОРМІВ	48
4.1 Обробка експериментальних даних	48
4.2 Визначення продуктивності та енергоємності процесу	51
4.3 Оцінка якості гранул	53
4.4 Методика інженерного розрахунку двошнекового екструдера	60
4.5 Висновки з розділу	63
5 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ	65
6 ЕКОНОМІЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ ДВОХШНЕКОВОГО ЕКСТРУДЕРА	69
ВИСНОВКИ	72
Бібліографія	74
Додатки	79

ВСТУП

При використанні будь-якої технології головним фактором, що визначає якість і кількість рибної продукції, є годування риби. В основному їх годують гранульованим комбікормом. Цей спосіб є універсальним, так як дозволяє здійснювати збалансоване і лікувальне харчування.

Однак, процес виробництва гранул для риби, особливо у фермерських господарствах, стримується відсутністю грануляторів невеликої продуктивності з високими техніко-економічними показниками.

Аналіз технології і обладнання для гранулювання показав, що машиною, що задовольняє перераховані вимоги, є шнековий екструдер.

Значна кількість досліджень була присвячена екструзії комбікормів для ВРХ, свиней та птиці, проте питання приготування кормів для галузі рибництва залишається маловивченим.

Тому наукове забезпечення і розробка шнекового екструдера невисокої продуктивності, що може застосовуватися при виробництві комбікормів для риби є дуже актуальною темою.

Дослідження технологічного процесу і визначення раціональних параметрів шнекового екструдера для виробництва комбікормів.

1 СТАН ПИТАННЯ ПРОЦЕСУ ВИРОБНИЦТВА КОМБІКОРМІВ ДЛЯ ОБ'ЄКТІВ АКВАКУЛЬТУРИ

1.1 Якісні характеристики комбікормів для об'єктів аквакультури

У таблиці 1.1 наведені показники, відповідні ДСТУ 52346-2005, що характеризують якість комбікорму для риби продуктивного віку, що вирощуються і відтворюються в аквакультурі.

Рибництво є галуззю тваринництва. Найбільший ефект в цій області досягається при повній механізації всіх процесів і він (ефект) істотно залежить від якості і кількості кормів, споживаних рибою.

Корми для риби поділяються на такі типи: стартовий, виробничий і ремонтний. Наш інтерес в даній роботі представляють виробничі корми.

Таблиця 1.1 – Якісний склад комбікормів для аквакультури

Показник	Од. вим.	Значення
Густина комбікорму	г/дм ³	1000-1400
Розмір гранул	мм	1-9
Протеїн	%	25-48
Жир	%	6-35
Вуглеводи	%	6-30
Зола	%	7-17
Клітковина	%	0,5-3
Поживність корму (загальна енергія)	ккал/МДж	4840/20,2-4944/20,7

Щоб задовольнити потреби риби в поживних речовинах та енергії, корм має містити необхідні поживні речовини (білки, ліпіди, вуглеводи, мінерали, вітаміни та інші біологічно активні речовини) в необхідній кількості та в правильних пропорціях.

Кількісно ефективність годування оцінюється кормовим коефіцієнтом, під ним розуміється відношення маси споживаного корму до приросту маси споживачів. Даний коефіцієнт розраховується за фактичними показниками приросту риби. Низький кормовий коефіцієнт свідчить про високу якість корму

і правильність складання рецептури. Кормовий коефіцієнт залежить не тільки від якості корму, а й умов утримання риби, а також виду риби [38,52,75,109].

Продукти тваринного і рослинного походження використовуються як джерело поживних речовин у кормах для риби (рис. 1.1).

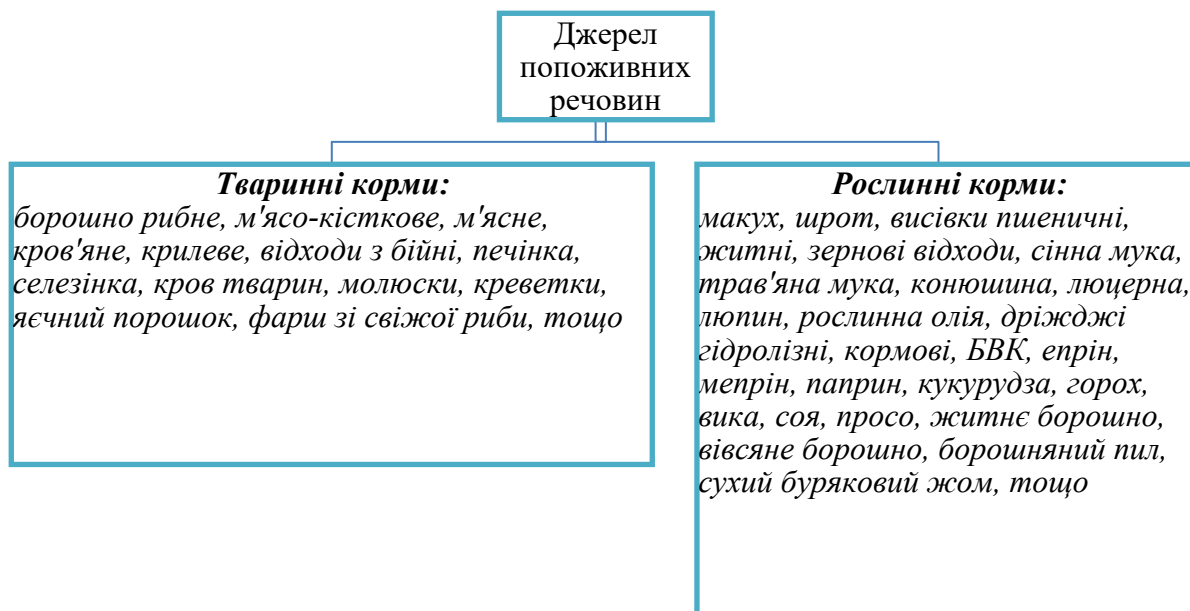


Рисунок 1.1 – Джерело поживних речовин

Отримують збалансовані корми для риби на основі рецептів, оскільки їх годування досить специфічне (корми повинні вноситися у водне середовище), то єдиним видом таких кормів є гранульовані.

Комбікорми для риби повинні відповідати ДСТУ 51899-2002 «Комбікорми гранульовані. Загальні технічні умови».

Гранульовані комбікорми повинні вироблятися відповідно до вимог стандарту і правилами організації та ведення технологічних процесів виробництва продукції комбікормової промисловості, затвердженими в установленому порядку.

У таблиці 1.2 представлені показники, що характеризують якість комбікормів для риби продуктивного віку, яких вирощують в аквакультурі.

Таблиця 1.2 – Органолептичні і фізичні показники комбікормів

Назва показника	Характеристика і норми
Зовнішній вигляд	Гранули циліндричної форми з глянцевою або матовою поверхнею без тріщин
Колір	Відповідний кольору розсипного комбікорму, з якого готують гранули або темніше.
Запах	Відповідний набору доброякісних компонентів вихідного комбікорму без затхлого пліснявого запаху
Густина гранул, г/дм ³	1000-1400г/дм ³
Масова частка вологи, % (трохи більше)	13,5
Діаметр гранул, мм	2,5-4,7
Довжина гранул, мм (не більше)	два діаметра
Крихкість гранул, % (не більше)	5
Прохід через сито з отворами діаметром 2 мм, % (не більше)	5
Водостійкість гранул, хв.	15

У відповідності зі специфікою годування риби комбікорми для них поділяють на три види, а саме:

- «донний» (потопаючий і довго зберігає свою структуру на дні, питома вага 1000-1400г / дм³): риби забирають корм з дна водойми, наприклад короп, а також креветки та інші ракоподібні (поїдають корм тільки з дна);

- «потопаючий»: (повільно опускається корм): призначений холодноводної і хижої риби;

- «плаваючий» (з поверхні води, питома вага 900-1000г / дм³): корм для тепловодних риби, так як вони їдять в 6 разів повільніше, ніж хижі риби, їм потрібно стабільність корму в воді.

Вимоги до якості комбікормів наведені в таблиці 1.2.

Якщо рибу вирощують у середовищі, де немає природного корму, наприклад, у басейнах, невеликих бетонних ставках, сітчастих садках (тобто в промислових умовах), корм має містити всі поживні речовини в достатній

кількості та пропорціях. Якщо рибу вирощують у земляних ставках, озерах, водосховищах або інших водоймах, де добре розвинена фауна (і флора) кормових організмів, навіть якщо корм є основним кормом (як, наприклад, у ставковому рибництві), можна використовувати прості раціони, що не є повними і збалансованими за поживними речовинами.

Годування риб вимагає суворого дозування. Якщо рибу перегодовувати, вона нерационально використовує поживні речовини. При недоїданні зростання буде уповільненим. Додаткова норма годівлі риби залежить від температури води (прямо пропорційно, але не пропорційно), ваги та віку (обернено пропорційно) і вмісту калорій (обернено пропорційно).

Залежно від призначення (стартові, виробничі і ремонтні) комбікорми характеризуються розмірами рис. 1.2

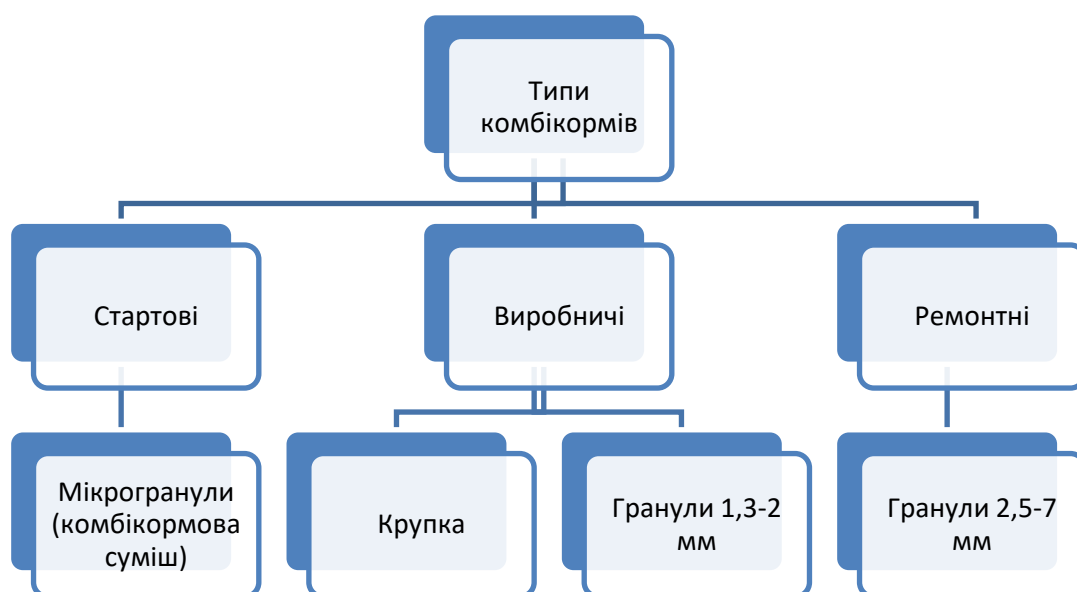


Рисунок 1.2 – Характеристика типів комбікормів за розмірами

1.2 Конструктивна та технологічна реалізація процесу гранулювання комбікормів

Класифікація пристроїв для пресування представлена на рис. 1.3.

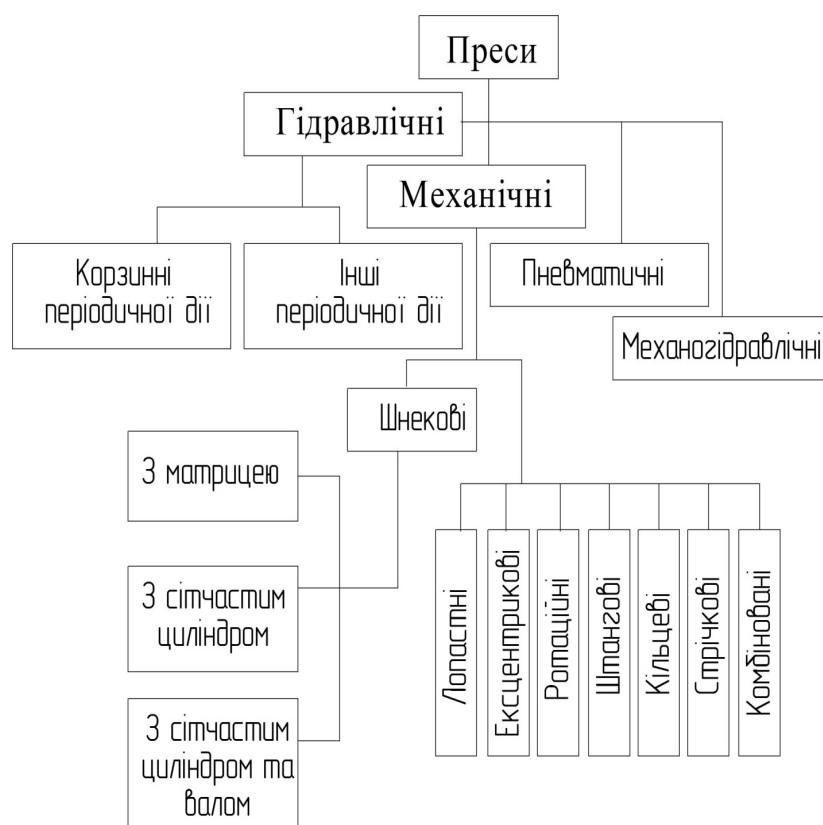


Рисунок 1.3 – Класифікація пресуючих пристроїв

На рис. 1.4 наведені технологічні схеми найбільш розповсюдженого обладнання для пресування.

Преси для гранулювання можна розділити на п'ять основних типів, кожен з яких має свої конструктивні особливості.

До першого типу (а на мал. 1.5) належать преси, які пресують гранули в комірках на поверхні двох валків, що обертаються один проти одного. Сировина стискається в цих комірках і падає з формувальних валків. Цей тип пресів не забезпечує високої міцності та щільності окатишів, має низьку продуктивність і споживає багато електроенергії.

До другого типу (б на рис. 1.5) належать зубчасті гранулятори. Продукт надходить у шестерні й видавлюється через отвори в основі зубів. Нерухомий ніж розрізає гранули. Цей тип преса в основному виробляє гранули діаметром 10-14 мм.

До третього типу (рис. 1.5, в) належать преси з нерухомими матрицями з різними діаметрами отворів, через які шнек видавлює продукт. Отримані

гранули розрізаються ножом. Такі преси в основному використовуються для виробництва вологих пресованих кормів. Вони мають низьку продуктивність і потребують спеціальних сушарок для гранул.

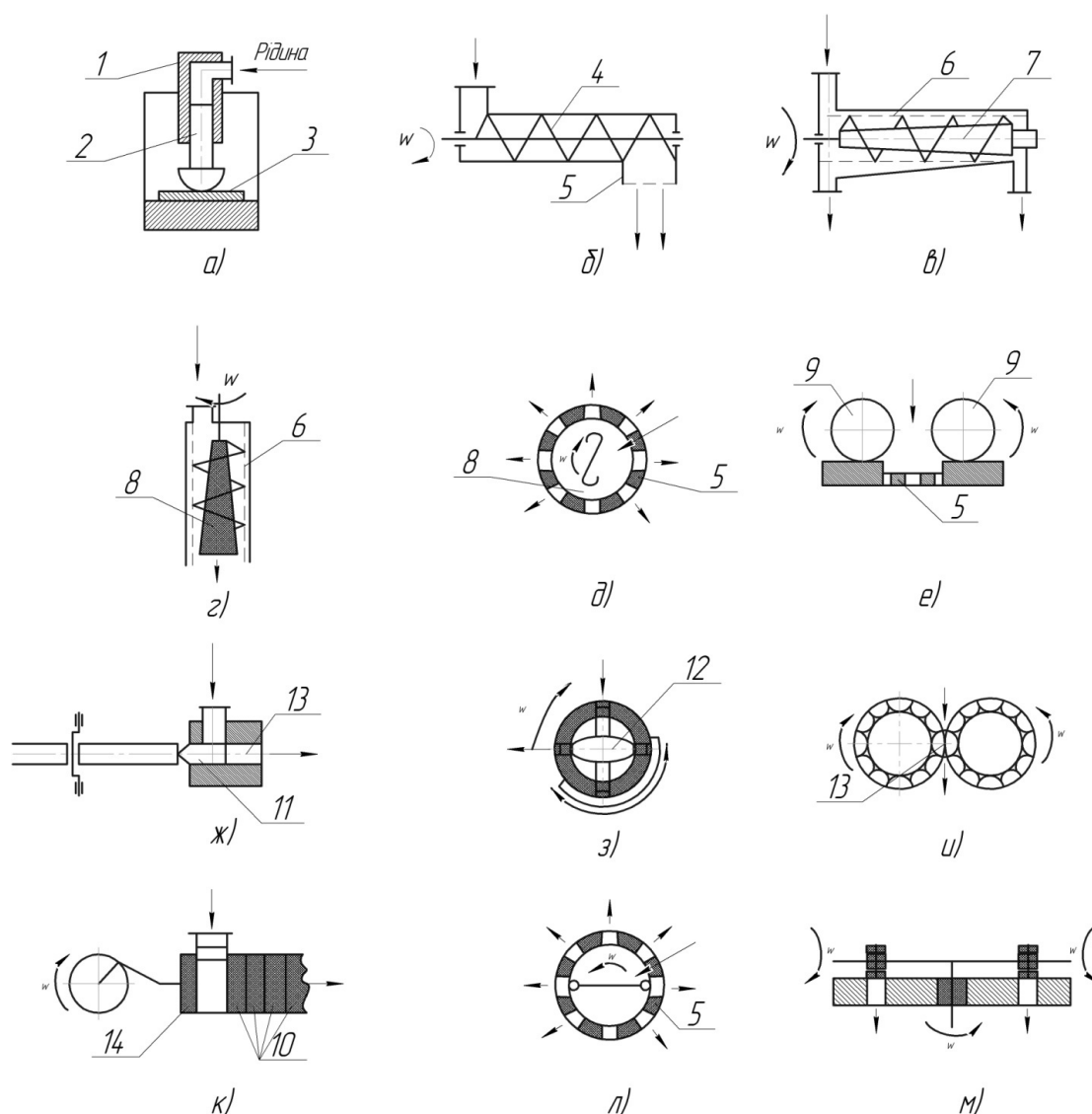


Рисунок 1.4 – Технологічні схеми обладнання для пресування

- а) гідравлічний; б) шнековий з матрицею; в) шнековий з сітчастим циліндром;
 г) шнековий з сітчастим циліндром і валом; д) лопатевий; е), л), м) валкові
 (роликові); ж) ексцентрикний; з) ротаційний; і) кільцевий; к) штемпельний
 1 – гідроциліндр; 2 – плунжер; 3 – пресуюча плита; 4 – шнек; 5 – матриця;
 6 – сітчастий циліндр; 7 – вал; 8 – сітчастий вал; 9 – валик; 10 – брикет;
 11 – пуансон; 12 – ротор; 13 – гранула; 14 – поршень.

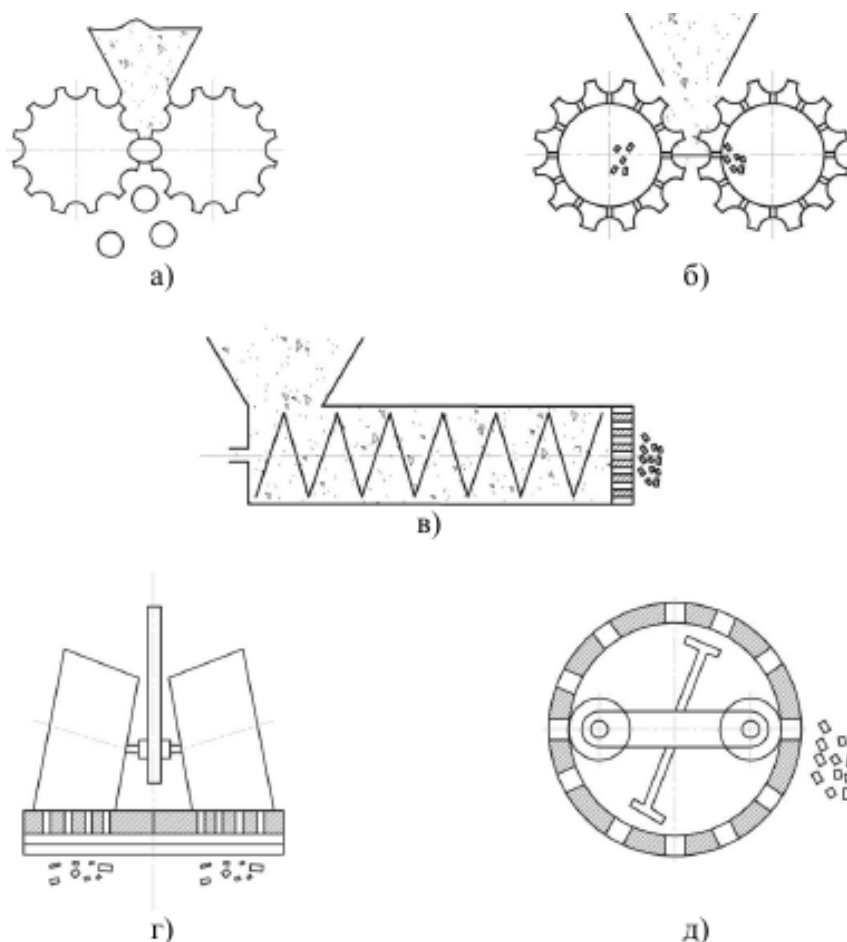


Рисунок 1.5 – Класифікація робочих органів прес - грануляторів:

а – з двома валками, що обертаються назустріч один одному; б – шестерні;
 в – нерухомі матриці з різними діаметрами отворів, через які шнек продавлює продукт; г – з горизонтальними плоскими матрицями; д – з горизонтальною або вертикальною кільцевою матрицею з радіальними отворами.

Четвертий тип (d на рис. 1.5) включає прес із горизонтальною плоскою матрицею та нерухомими ножами. Гранули видавлюються обертливими роликами, що стикаються зі штампом. У таких пресах штамп і ролики зношуються нерівномірно через різницю в окружній швидкості між штампом і роликами. Відцентрові сили виносять продукт до периферії штампа, що порушує рівномірність навантаження на обробну поверхню штампа.

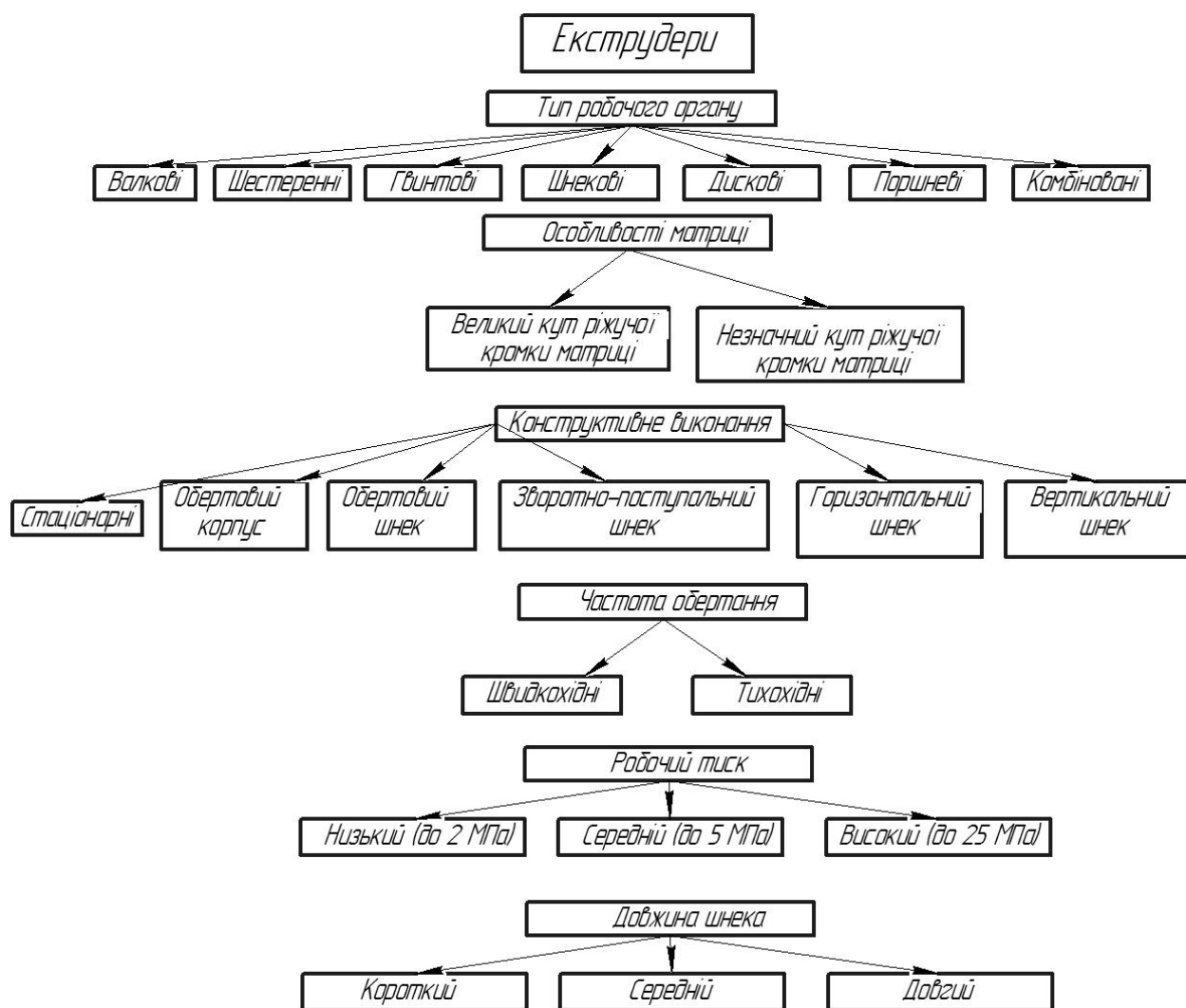


Рисунок 1.6 – Класифікація екструдерів

П'ятий тип преса (рис. 1.5, д) є найбільш поширеним. Він складається з обертового горизонтального або вертикального кільцевого штампа з радіальними отворами. Продукт надходить у камеру преса і за допомогою скребоків подається між матрицею і пресувальними роликками. Пресувальні роликки прошовують продукт через отвори в матриці і розрізають його на гранули за допомогою нерухомих ножів. Цей тип преса має високу продуктивність і споживає відносно мало енергії.

Виходячи з того, що гранули для перерахованих вище видів риби повинні бути тонучими і мати щільність не менше 1400 г / дм^3 , найбільш доцільними для таких комбікормів будуть шнекові гранулятори (тип 3 рис. 1.5, в). Для зниження питомої металоемності і енергоемності застосовують двошнекові

екструдери, коли шнеки розташовані в одному корпусі і працюють на одну матрицю.

Класифікація машин для екструзії, що застосовуються в комбікормовому виробництві за типом робочого органу, за фізичними ознаками, за конструктивним виконанням, по частоті обертання шнека, по робочому тиску і по довжині шнека (рис. 1.6).

Основними елементами в шнековому прес-грануляторі (екструдері) є матриця, шнек і робоча камера, де відбувається пресування [82, 85, 111, 113].

Матриця являє собою плоский металевий диск з отворами, через які продавлюється маса. Форма отвору матриці визначає форму виробу. Коли грудка вдавлюється в отвір матриці, вона набуває певної форми. Основні вимоги до матриць:

1. Низька хімічна активність і стирання;
2. Забезпечення спресовування суміші; тиск, що створюється шнеком, залежить від гідравлічного опору в отворах. Опір визначається складом суміші, формою і розміром отворів.

Класифікація матриць по геометричних ознаках представлена на рис. 1.7.

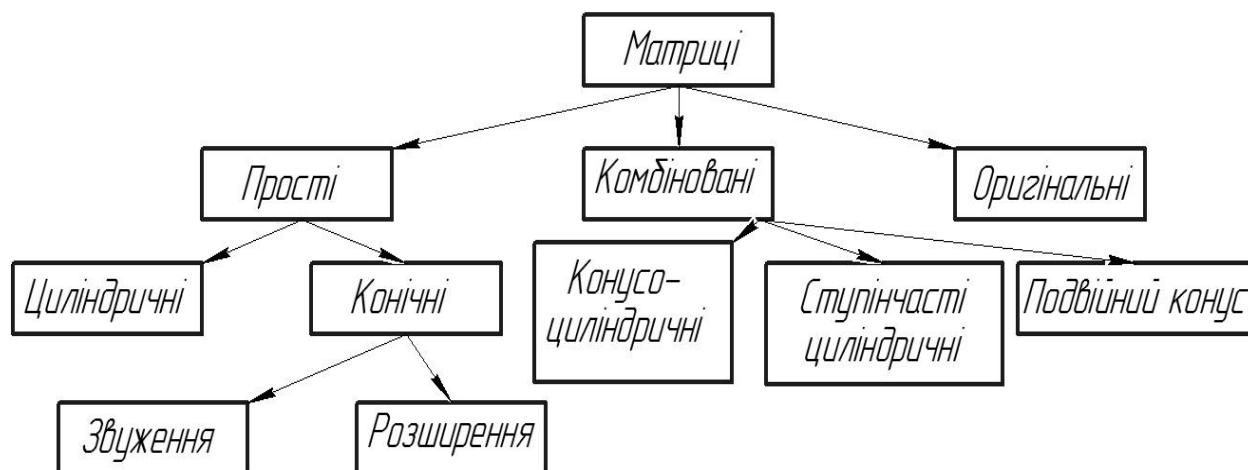


Рисунок 1.7 – Типи матриць екструдерів

Робоча камера являє собою зону, де відбувається перемішування, переміщення і пресування суміші комбікорму, далі суміш формується в гранули. У камері створюється необхідний тиск для пресування суміші [1,103].

Основні вимоги до робочої камери:

1. Мінімальне тертя уздовж осі;
2. Виключення повертання маси зі шнеком.

На рис. 1.8 представлена класифікація робочих камер.

Шнек використовують для подачі, нагнітання або змішування компонентів комбікормів. У прес-грануляторі шнек служить нагнітаючим пристроєм, що створює необхідний тиск для формування гранул за допомогою матриць [1,99,111].

Основні вимоги до шнеків:

1. Ковзання суміші по поверхні шнека;
2. Ефективне використання поверхні матриці.

На рис. 1.9 представлена класифікація шнеків по геометричній формі.

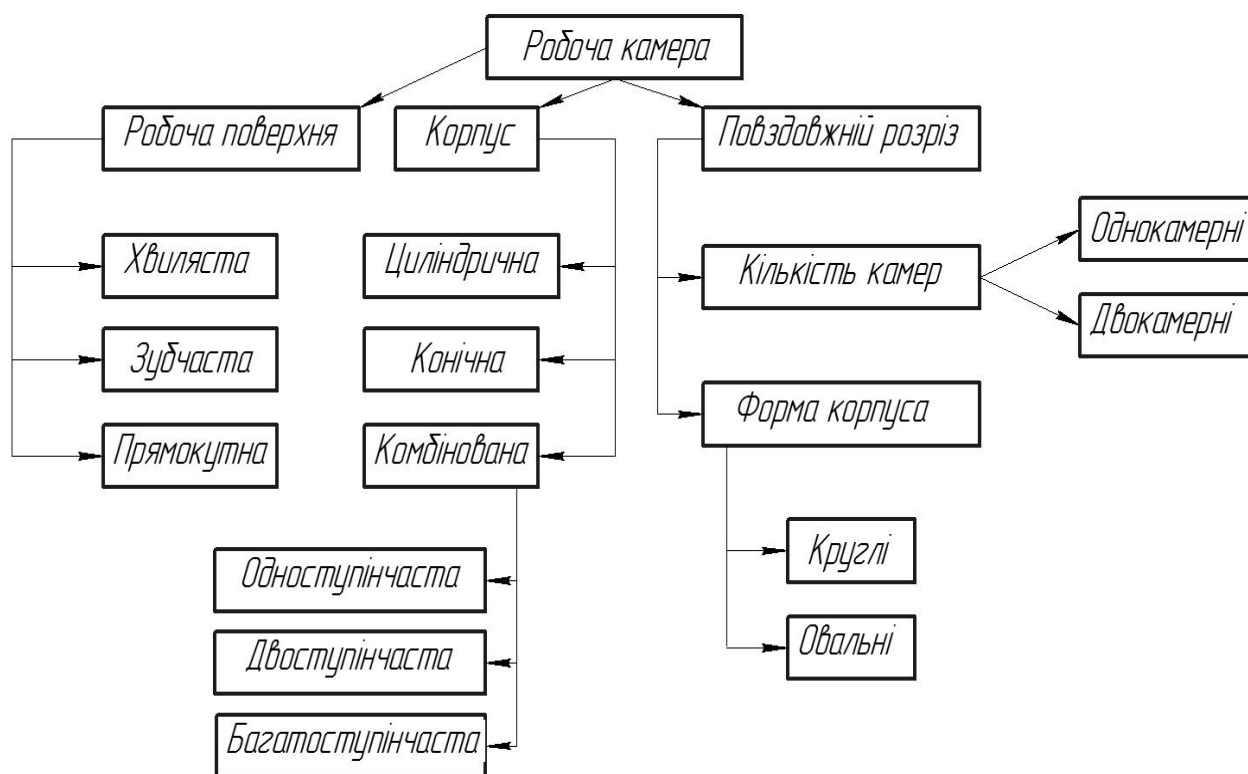


Рисунок 1.8 – Класифікація робочих камер екструдерів

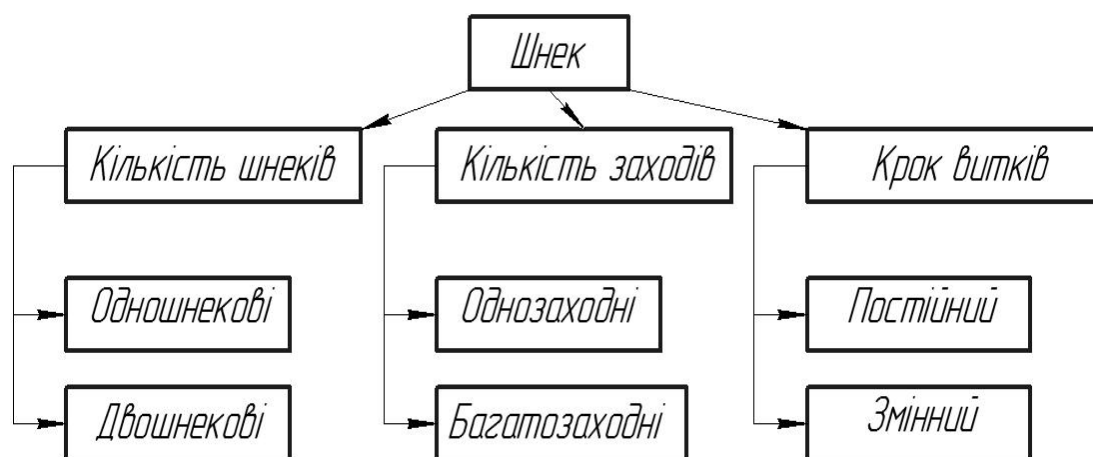


Рисунок 1.9 – Класифікація шнеків екструдерів за геометричною формою

Основні характеристики відомих конструкцій екструдерів представлені в таблиці 1.3.

Таблиця 1.3 – Порівняльні показники екструдерів

Екструдери			Продуктивність, кг/год	Потужність двигуна, кВт	Енергоємність, кВт·год/кг
Країна	Фірма	Марка			
Росія	ООО «Доза-Агро»	Екструдер К-40	До 50	7,5	0,15
		Екструдер К-50	До 85	10	0,12
Чехія	Farmer	Екструдер Е-250	До 250	30	0,12
Китай	MUYANG	Двошнековий екструдер МУ56*2А	30-100	22	0,7-0,22
Китай	SAIXIN	Двошнековий екструдер DS56-III	120-150	22	0,18-0,14
Україна	ПП Лаврин	Екструдер зерновий ЕКЗ-20	20	2,2	0,11
		Екструдер зерновий ЕКЗ-40	40	4	0,1
		Екструдер зерновий ЕКЗ-75	75	7,5	0,1
		Екструдер зерновий ЕКЗ-95	95	11	0,12
Росія	ООО «Апрель»	Екструдер Штак-30	60	11	0,18
		Екструдер Штак-50	60-180	37	0,62-0,21
		Екструдер Штак-80М	60-200	45	0,75-0,23
Швейцарія	«Buhler»	Екструдер BASL-45	30-80	9	0,3-0,11
США	«Wenger»	Екструдер ТХ-52	50-450	22,5	0,45-0,05

Сучасні конструкції екструдерів передбачають поєднання ряду процесів (змішування, теплова обробка, стискання, транспортування і формування в отворах матриці) в одному пристрої з метою здійснення повного технологічного циклу з обробки сировини аж до термічно обробленого виробу.

Двохшнекові екструдери забезпечують більш високу якість продукції і питомі показники.

Виходячи, з проведеного аналізу в якості об'єкта дослідження приймаємо двошнековий екструдер для виробництва комбікормів методом вологого гранулювання.

1.3 Огляд теоретичних досліджень процесу гранулювання комбікормів

Екструзія (extrude, лат. виштовхування, видавлювання) – процес термомеханічної обробки харчової сировини шляхом видавлювання через формуючі отвори робочого органу з метою отримання виробів заданої форми, структури і фізико-хімічних властивостей.

Широке застосування екструдерів в харчових виробництвах обумовлено перевагами формування сировини методом видавлювання, варіюванням продуктивності та безперервністю процесу, що зумовлює сприятливі умови для створення комплексно-механізованих ліній. Застосування в конструкції екструдера різноманітних змінних матриць створює умови для випуску продукції широкого асортименту.

В даний час процес екструзії може виконуватися в такий спосіб:

1. Холодне пресування (грануляція) – температура 40...75°C, низький тиск (0,6...0,9 МПа), із вмістом води в сировині $W = 30...60\%$ і повільно перемішується, переміщується під тиском і формується в задану форму, так що можливий тільки механічний вплив на продукт. Цей вид екструзії використовується при виробництві макаронних виробів, кормів для тварин, різних кондитерських та інших кондитерських виробів;

2. Тепла екструзія (желювання) – температура 70-120°C, тиск помірний (0,8-1,3 МПа), вміст вологи в сировині $W = 20-30\%$, сухі компоненти сировини зміщуються з певною кількістю води, і крім механічного впливу застосовується тепловий. Отриманий екструдат характеризується низькою щільністю, незначним збільшенням об'єму і пластичністю;

3. Гаряче пресування – при температурі 130-180°C і високому тиску (0,8-25 МПа), за вологості сировини $W = 10-20\%$, здійснюване з великою швидкістю і тиском, за якого механічна енергія значною мірою перетворюється на теплову, а якість сировини змінюється з глибиною. Гаряча екструзія дає змогу отримувати готові до вживання харчові продукти, які не потребують додаткової обробки. Найпоширеніша назва цього процесу екструзії – термопластична екструзія.

В результаті аналізу способів класифікації екструдерів, видно, що процес екструзії об'єднує в собі як процес простого формування (вологе пресування), так і теплову обробку продукту під тиском.

Вперше метод екструзії застосований в 1797 році в Англії при виробництві безшовних труб. У 1866 р інженером «А. G. DayCo »(США) А. Г. де Вольфі був сконструйований шнековий екструдер для накладення кабельної ізоляції. Перший шнековий екструдер, був створений фірмою «Follows&Bate» (Англія) в 1869 р для виробництва ковбас. Перший патент на екструзійну машину з архімедовим гвинтом був виданий М. Грей в 1879 р. Перший промисловий шнековий екструдер, призначений для переробки термопластичних матеріалів, був сконструйований Паулем Трестером в 1953 р.

Надалі основні дослідження в області екструзії проводилися головним чином, в області виготовлення пластмасових джгутів і гранул.

Основоположниками теорії переробки полімерів були Г. Шенкель, Т. Торнер, З. Тадмор, вони внесли значний вклад в розвиток математичних моделей екструдерів. Подальший розвиток теорії пресування кормів займалися зарубіжні та вітчизняні вчені О.В. Абрамов, Х. Геррман, І.Е. Груздєв, В.Ф. Некрашевич, В.І. Особов, А.Н. Остриков, А.С. Рудометкін та ін.

Головною метою їх досліджень була розробка математичних моделей для визначення продуктивності і тиску в залежності від геометричних і кінематичних параметрів екструдера.

Так Г. Шенкель для розрахунку продуктивності процесу просування матеріалу в завантажувальній зоні пропонує наступне рівняння:

$$Q = \pi^2 \cdot D \cdot (D - h) \cdot h \cdot n \cdot \sin\varphi \cdot \cos\varphi \cdot (1 - \operatorname{tg}\varphi \cdot \operatorname{ctg}\omega) \quad (1.1)$$

де Q – продуктивність в зоні завантаження екструдера, кг/год; D – зовнішній діаметр шнека, м; n – частота обертання шнека, с^{-1} ; h – глибина нарізки шнека, м; φ – кут підйому гвинтової лінії, град.

Рівняння Г. Шенкеля, дозволяє встановити, як залежать продуктивність і приріст тиску в завантажувальній зоні від коефіцієнтів тертя шнека і циліндра.

Д.М. Мак-Келві рекомендує розрахунок об'ємної продуктивності екструдера виробляти за такою формулою:

$$Q = \frac{\pi \cdot D \cdot N \cdot \cos\alpha}{\cos\alpha + \sin(90 - \beta) \cdot \operatorname{ctg}\alpha} \cdot s \cdot h, \quad (1.2)$$

де Q – продуктивність в зоні завантаження екструдера, кг/год; D – зовнішній діаметр шнека, м; α – кут підйому гвинтової лінії, град; s – ширина гвинтового каналу, м; h – висота гвинтового каналу, м. Формула К. Шнейдера для розрахунку об'ємної продуктивності в зоні подачі екструдера виглядає наступним чином:

$$Q = \pi^2 \cdot D \cdot h \cdot N \cdot (D - h) \cdot \frac{t - e}{t} \cdot \frac{\operatorname{tg}(90 - \beta) \cdot \operatorname{tg}\alpha}{\operatorname{tg}(90 - \beta) + \operatorname{tg}\alpha}, \quad (1.3)$$

де Q – продуктивність в зоні подачі екструдера, кг / год; D – зовнішній діаметр шнека, м; t – крок між витками шнека, м; α – кут підйому гвинтової лінії, град; h – висота гвинтового каналу, м.

Для випадку нерівності коефіцієнтів тертя об поверхню шнека і циліндра В.А. Сілін пропонує проводити розрахунок об'ємної продуктивності зони завантаження за наступним рівнянням:

$$Q = \frac{\pi \cdot (D^2 - d^2) \cdot (t - e) \cdot 60 \cdot n \cdot \rho \cdot \psi}{8 \cdot 10^3} \left[\frac{\cos\alpha \cdot \cos(\alpha + \beta)}{\left(1 + \frac{t}{\pi \cdot D}\right) \cdot \cos\beta} + \frac{\cos(\alpha + \beta)}{(1 + k) \cdot \cos\beta} \right], \quad (1.4)$$

де Q – продуктивність в зоні завантаження екструдера, кг/год; D – зовнішній діаметр шнека, м; d – внутрішній діаметр шнека, м; n – частота обертання шнека, s^{-1} ; t – крок між витками шнека, м; h – висота гвинтового каналу, м; e – ширина гребеня нарізки шнека уздовж осі, м; ρ – щільність, що залежить від температури і тиску, kg/m^3 ; α – кут підйому гвинтової лінії, град; β – кут напрямку руху матеріалу відносно площини, перпендикулярної осі шнека і циліндра, град.

Наведені вище формули є прикладом геометричного підходу до вирішення математичного моделювання процесу екструзії полімерів, З. Тадмор вивів формулу продуктивності, враховуючи в'язкість суміші [102]:

$$Q = \frac{\pi \cdot (D^2 - d^2) \cdot (H - e) \cdot 60 \cdot n \cdot \rho}{4} \cdot \eta_{\partial} \cdot \left(1 - \frac{P_e}{P_{max}}\right), \quad (1.5)$$

де Q – продуктивність в зоні завантаження екструдера, кг/год; D – зовнішній діаметр шнека, м; d – внутрішній діаметр шнека, м; H – висота гвинтового каналу, м; e – ширина гребеня нарізки шнека уздовж осі, м; n – частота обертання шнека, s^{-1} ; ρ – щільність, що залежить від температури і тиску, kg/m^3 ; η_{∂} – в'язкість, $Pa \cdot s$; P_e – робочий тиск екструдера, Pa ; P_{max} – максимальний тиск екструдера, Pa .

Основою наведених вище математичних моделей є теорія транспортувальних шнеків, рух полімеру в каналі шнека розглядається як передача частини обсягу одного витка за один оборот.

Основними характеристиками оброблюваного полімеру в наведених вище рівняннях є щільність, в'язкість, і коефіцієнт тертя, і вони розглядаються як постійні величини.

У роботах по екструзії комбікормів приймалися тільки коефіцієнти тертя і міцність. В'язкість взагалі не розглядалася.

Тим часом, практика виробництва комбікормів на екструдерах показує, що головним параметром є в'язкість, від якої залежить тертя і всі інші параметри. В'язкість є змінним параметром, що залежить від тиску і температури.

Таким чином, припускаємо, що розроблювана теоретична модель екструзії комбікормів буде зорієнтована на процес холодного пресування ($T = \text{const}$ і $W = 30-60\%$) і на в'язкість, що залежить від швидкості деформації. В такому випадку суміш комбікормів повинна розглядатися як тиксотропне середовище, в якій в'язкість зростає при захопленні швидкості деформації, і може бути описана законом Оствальда-де-Віля рівняння:

$$\eta = \mu \cdot (\dot{\gamma})^{n-1} \quad (1.6)$$

де η - в'язкість комбікорму, Па·с; μ - реологічний параметр, що характеризує консистенцію матеріалу, Па·с; $\dot{\gamma}$ - швидкість деформації, с⁻¹; n - індекс потоку.

1.4 Висновки з розділу

1. Визначення якості комбікормів для риби продуктивного віку, що вирощуються в аквакультурі, є критично важливим для забезпечення ефективності риборівництва. Згідно з показниками, наведеними в таблицях 1.1 та 1.2, комбікорми повинні відповідати певним стандартам, які гарантують їх поживну цінність та органолептичні характеристики. Виробничі корми, що є предметом даного дослідження, мають бути збалансованими та виготовленими відповідно до вимог ДСТУ, щоб забезпечити рибі необхідні поживні речовини в оптимальних пропорціях. Ефективність годівлі риби оцінюється через кормовий коефіцієнт, що демонструє взаємозв'язок між споживаним кормом і приростом маси. Отже, дотримання всіх технічних і органолептичних норм при виробництві комбікормів є запорукою успішного ведення аквакультури та оптимізації процесів годування риби.

2. Класифікація пресуючих пристроїв та технологічні схеми обладнання для пресування демонструють різноманітність конструктивних рішень, що використовуються в комбікормовому виробництві. Зокрема, шнекові гранулятори (тип 3) виявляються найбільш доцільними для виробництва кормів, оскільки вони забезпечують необхідну щільність гранул і високу продуктивність. Двошнекові екструдери, завдяки своїй конструкції, забезпечують ефективне пресування та якість продукції, що робить їх ідеальними для виробництва комбікормів методом вологого

гранулювання. Вибір конкретного типу преса залежить від технологічних вимог і фізичних властивостей сировини, що підкреслює важливість оптимізації процесів у виробництві кормів.

2 ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ЕКСТРУЗІЇ КОМБІКОРМІВ

2.1 Визначення продуктивності двошнекового екструдера

Раніше були показані переваги двошнекового екструдера. Створення такої конструкції призвело до поступового зближення шнеків, а потім до перекриття витків шнеків. Окремі конструкції шнекових екструдерів показали, що найбільш ефективною є конструкція екструдера з двома шнеками які зачіпляються.

Продуктивність двошнекового екструдера – максимальна подача комбікормової суміші з раціональними параметрами машини і при виконанні всіх вимог якості (вимоги до якості гранульованих комбікормів наведені в таблиці 1.1 та 1.2).

Перевагами цих екструдерів в порівнянні з одношнековими є:

1. Отримання високого тиску видавлювання при переробці комбікормової суміші;
2. Рівномірний вихід матеріалу без пульсації, що сприятливо позначається на якості виробу;
3. Отримання кінцевих продуктів з вихідних матеріалів за один прохід їх через екструдер;
4. Додаткове змішування всіх компонентів комбікормової суміші.

Процеси потоку комбікормової суміші в даному типі екструдерів ще більш складні, ніж в одношнекових, і недостатньо вивчені, в зв'язку, з чим розрахунок цих машин в основному базується на емпіричних даних. Проте, це завдання можна вирішити.

На рис. 2.1 зображена схема розташування шнеків двошнекового екструдера.

При цьому витісненим об'ємом приймається кільцева зона, заповнена масою.

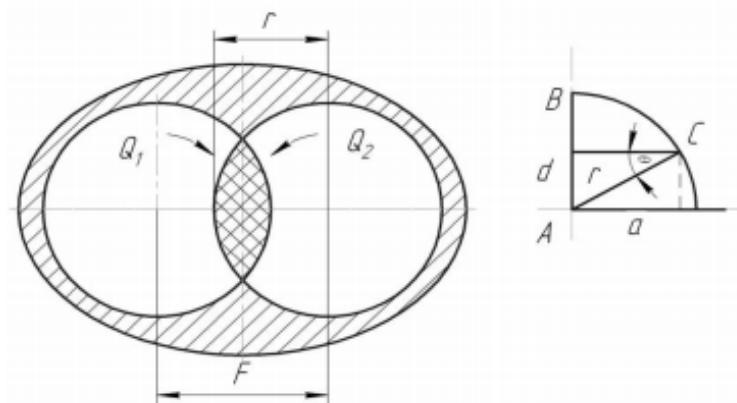


Рисунок 2.1 – Розрахункова схема двошнекового екструдера

Продуктивність двошнекового екструдера матиме вигляд:

$$Q = (V_1 + V_2 - V_{\text{пер}}) \cdot m \cdot n, \quad (2.1)$$

де Q – продуктивність двошнекового екструдера, кг/год; V_1 – об'єм, утворений першим шнеком, обмежений з одного боку витками шнека, а з іншого боку – циліндричними поверхнями корпусу екструдера і валом шнека, м^3 ; V_2 – об'єм, утворений другим шнеком, обмежений з одного боку витками шнека, а з іншого боку – циліндричними поверхнями корпусу екструдера і валом шнека, м^3 ; $V_{\text{пер}}$ – об'єм перекриття двох шнеків, м^3 ; m – число заходів шнека; n – частота обертання шнека, с^{-1} .

Об'єм, що утворюється першим шнеком, визначається за формулою:

$$V_1 = S_{\text{ш1}} \cdot t, \quad (2.2)$$

де V_1 – об'єм утворений першим шнеком, м^3 ; $S_{\text{ш1}}$ – площа витка першого шнека, м^2 ; t – крок між витками шнека, м.

Об'єм утворений другим шнеком визначається за формулою:

$$V_2 = S_{\text{ш2}} \cdot t, \quad (2.3)$$

де V_2 – об'єм утворений другим шнеком, м^3 ; $S_{\text{ш2}}$ – площа витка другого шнека, м^2 ; t – крок між витками шнека, м.

Об'єм перекриття двох шнеків може визначатися за формулою:

$$V_{\text{пер}} = 2 \cdot S_{\text{пер}} \cdot \varepsilon, \quad (2.4)$$

$V_{\text{пер}}$ – об'єм перекриття двох шнеків, м^3 ; $S_{\text{пер}}$ – площа перекриття витків двох шнеків, м^2 ; ε – товщина витка шнеку, м.

Визначимо площу перекриття витків шнеків:

$$S_{пер} = 4 \cdot S_{i\ пер}, \quad (2.5)$$

де $S_{i\ пер}$ – площа перекриття однієї секції, м².

Площа перекриття однієї секції:

$$S_{i\ пер} = \frac{r^2 \cdot \left(\frac{\pi}{2} - \theta\right) - f \cdot a}{2}, \quad (2.6)$$

де r – радіус шнека (радіус кола описує частину перекриття), м; θ – кут, град, $\theta = \arccos \frac{a}{r}$; $f = \frac{F}{2}$, F – відстань між центрами окружності, м.

Отже, площа перекриття витків двох шнеків буде:

$$S_{i\ пер} = r^2 \cdot \left(\frac{\pi}{2} - 2\theta\right) - 2f \cdot a, \quad (2.7)$$

Підставляючи (2.2, 2.3 і 2.34) в (2.1), отримуємо продуктивність двошнекового екструдера, враховуючи площу перекриття шнеків:

$$Q = \left(2\pi \cdot r^2 \cdot t - \varepsilon \cdot \left(r^2 \cdot \left(\frac{\pi}{2} - 2\theta\right) - 2f \cdot a\right)\right) \cdot m \cdot n, \quad (2.8)$$

2.2 Визначення форми отворів матриці по її довжині

Визначення раціонального вхідного радіуса отвору. З огляду на реологічні параметри комбікормової суміші і геометричні параметри формуючої матриці можна прийняти такий вираз для визначення продуктивності:

$$Q \approx Q_M, \quad (2.9)$$

де Q – продуктивність екструдера, кг / год; Q_M – продуктивність матриці, кг / год.

$$Q_M = Q_{отв} \cdot n_{отв}, \quad (2.10)$$

де $Q_{отв}$ – продуктивність одного отвору, кг/год; $n_{отв}$ – кількість отворів в матриці.

Вченими було встановлено, що при процесі продавлювання продукту, а також збільшення якості гранул, необхідно мати постійну швидкість потоку в філь'єрі по всій довжині отвору. Як показав аналіз робіт з гранулювання, при використанні циліндричного, конічного та інших форм отворів цього досягти неможливо. Однак було визначено, що форма отвору з постійною швидкістю потоку (рис. 2.2) описується рівнянням кривої:

$$y = \frac{R}{\sqrt[4]{1+2 \cdot \eta^2 \cdot g \cdot \frac{R^4}{Q_{np}^2} \cdot l}}, \quad (2.11)$$

де R – змінний радіус перетину отвору, м; g – прискорення сили тяжіння, м/с²; Q_{np} – граничний витрата, кг/год; η – в'язкість, Пас; x – поточна координата уздовж осі ОХ.

На необхідної довжині $x=l$, рівняння (2.11) приймає вид:

$$y = \frac{R}{\sqrt[4]{1+2 \cdot \eta^2 \cdot g \cdot \frac{R^4}{Q_{np}^2} \cdot l}}, \quad (2.12)$$

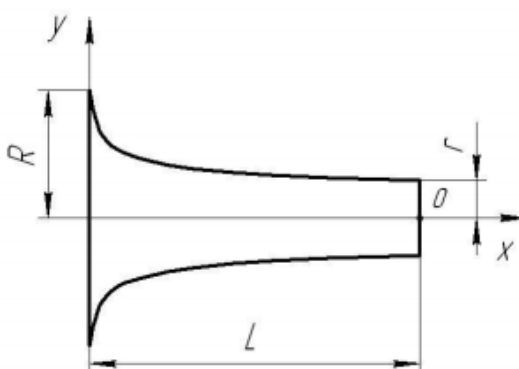


Рисунок 2.2 – Схема перерізу отвору з постійною пропускною спроможністю

Виходячи з того, що відомий малий радіус в даній точці O (це розмір гранул), при відомій довжині $y=r$, виходить:

$$r = \frac{R}{\sqrt[4]{1+2 \cdot \eta^2 \cdot g \cdot \frac{R^4}{Q_{np}^2} \cdot l}}, \quad (2.13)$$

При сталому витіканню в'язкої рідини в тонкій циліндричній трубці круглого перетину, продуктивність матиме вигляд:

$$Q = \frac{\pi \cdot R^4 \cdot \Delta p}{8 \cdot \eta \cdot l}, \quad (2.14)$$

де Q – витрата рідини в отворі, кг/год; R – радіус отвору, м; Δp – різниця тисків на вході і на виході з отвору, Па; η – в'язкість рідини, Па·с; l – довжина отвору, м.

Так, як комбікорм відноситься до не ньютонівської псевдопластичної рідини, для опису течії комбікормів в процесі екструзії використовується

рівняння статичного закону Освальда-де-Віля. Відповідно, величина в'язкості, з урахуванням реологічних властивостей комбікорми матиме вигляд:

$$\eta = \mu(\dot{\gamma})^{n-1}, \quad (2.15)$$

де η – в'язкість комбікорми, Па·с; μ – реологічний параметр, що характеризує консистенцію матеріалу, Па·сⁿ; $\dot{\gamma}$ – швидкість деформації; n – індекс потоку.

Вважаємо, що продуктивність у формулі (2.13) дорівнює продуктивності (2.14) в початковий момент часу t_0 .

З формули (2.13) знаючи вихідний радіус, виразимо вхідний радіус:

$$r^4 = \frac{R^4}{1 + 2 \cdot \eta^2 \cdot g \cdot \frac{R^4}{Q_{np}^2} \cdot l}, \quad (2.16)$$

$$1 + 2 \cdot \eta^2 \cdot g \cdot \frac{R^4}{Q_{np}^2} \cdot l = \frac{R^4}{r^4}, \quad (2.17)$$

$$2 \cdot \eta^2 \cdot g \cdot \frac{R^4}{Q_{np}^2} \cdot l \cdot \frac{R^4}{r^4} = -1, \quad (2.18)$$

$$R^4 \left(\frac{1}{r^4} - 2 \cdot \eta^2 \cdot g \cdot \frac{l}{Q_{np}^2} \right) = 1, \quad (2.19)$$

$$R^4 = \frac{1}{\frac{1}{r^4} - 2 \cdot \eta^2 \cdot g \cdot \frac{l}{Q_{np}^2}}, \quad (2.20)$$

Підставивши (2.14) в (2.20), отримаємо:

$$R^4 = \frac{1}{\frac{1}{r^4} - 2 \cdot \eta^2 \cdot g \cdot \frac{l}{\frac{\pi^2 \cdot R^8 \cdot \Delta p^2}{8^2 \cdot \eta^2 \cdot l^2}}}, \quad (2.21)$$

$$R^4 = \frac{1}{\frac{1}{r^4} - \frac{128 \cdot \eta^4 \cdot l^3 \cdot g}{R^8 \cdot \Delta p^2 \cdot \pi^2}}, \quad (2.22)$$

$$\frac{R^4}{r^4} - \frac{128 \cdot \eta^4 \cdot l^3 \cdot g}{R^8 \cdot \Delta p^2 \cdot \pi^2} = 1, \quad (2.23)$$

$$\frac{R^8}{r^4} - R^4 = \frac{128 \cdot \eta^4 \cdot l^3 \cdot g}{\Delta p^2 \cdot \pi^2}, \quad (2.24)$$

Приймаємо що $R^4 = R_1$, підставляємо в (2.22) і отримуємо квадратне рівняння:

$$R_1^2 - r^4 \cdot R_1 = \frac{128 \cdot \eta^4 \cdot l^3 \cdot r^4 \cdot g}{\Delta p^2 \cdot \pi^2}, \quad (2.25)$$

$$R_1^2 - r^4 \cdot R_1 - \frac{128 \cdot \eta^4 \cdot l^3 \cdot r^4 \cdot g}{\Delta p^2 \cdot \pi^2} = 0, \quad (2.26)$$

$$R_{1.1.2} = \frac{r^4 \pm \sqrt{\frac{r^8 \cdot 496 \cdot \eta^4 \cdot l^3 \cdot r^4 \cdot g}{\Delta p^2 \cdot \pi^2}}}{2}, \quad (2.27)$$

Виходячи з того що $R_1 > 0$, підкореневий вираз $\frac{r^8 \cdot 496 \cdot \eta^4 \cdot l^3 \cdot r^4 \cdot g}{\Delta p^2 \cdot \pi^2} > 0$, оскільки

$$r > 0 \Rightarrow \frac{r^8 \cdot 496 \cdot \eta^4 \cdot l^3 \cdot r^4 \cdot g}{\Delta p^2 \cdot \pi^2} \geq r^4.$$

У випадку $\frac{r^8 \cdot 496 \cdot \eta^4 \cdot l^3 \cdot r^4 \cdot g}{\Delta p^2 \cdot \pi^2} = r^4$, $R_1 = 0$ що суперечить визначенню R_1 .

У випадку $\frac{r^8 \cdot 496 \cdot \eta^4 \cdot l^3 \cdot r^4 \cdot g}{\Delta p^2 \cdot \pi^2} > r^4$, $R_1 < 0$ що також суперечить визначенню R_1

Отже, з (2.27), отримуємо:

$$R_{1.1.2} = \frac{r^4 + \sqrt{\frac{r^8 \cdot 496 \cdot \eta^4 \cdot l^3 \cdot r^4 \cdot g}{\Delta p^2 \cdot \pi^2}}}{2} = 0, \quad (2.28)$$

Так як $R^4 = R_1 = R = \sqrt[4]{R_1}$, отримуємо рівняння для визначення змінного радіусу для отвору з постійною пропускною спроможністю:

$$R = \sqrt[4]{\frac{r^4 + \sqrt{\frac{r^8 \cdot 496 \cdot \eta^4 \cdot l^3 \cdot r^4 \cdot g}{\Delta p^2 \cdot \pi^2}}}{2}}. \quad (2.29)$$

Визначення швидкості переміщення частинок матеріалу через отвір.

Процес ущільнення комбікормів, що передує початку екструзії, досліджений багатьма авторами.

Припускаємо, що тиск p_1 що відповідає початку екструзії, відомо, щільність матеріалу ρ і закон зміни в'язкості також відомі. Якщо прийняти, що процес екструзії є термічний і сталий, для вирішення завдання можна використовувати рівняння Новье-Стокса, які в силу прийнятих припущень представляється у вигляді:

$$\frac{\partial p}{\partial x} = 0, \quad \frac{\partial p}{\partial y} = 0, \quad (2.30)$$

$$v \cdot \frac{\partial v}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\eta}{\rho} \cdot \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right), \quad (2.31)$$

$$\frac{\partial v}{\partial z} = 0, \quad (2.32)$$

де v – швидкість частинок матеріалу уздовж осі OZ , м/с; p – функція тиску в рухомому уздовж цієї осі матеріалу, Па.

З рівняння (2.31) випливає, що $v = v(x, y)$, а з (2.30) – що $p = p(x)$.

Система рівностей (2.30) – (2.32) зводиться до одного рівняння:

$$\eta \cdot \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) = \frac{\partial p}{\partial z}, \quad (2.33)$$

Ліва частина рівняння (2.33) являє собою функцію тільки від x і y , права – тільки від z . Отже, ліва і права частини рівняння (2.33) окремо величини постійні.

Позначимо:

$$\frac{\partial p}{\partial z} = \text{const} = -\frac{p_1 - p_2}{l} = -\frac{\Delta p}{l}, \quad (2.34)$$

де $\Delta p = p_1 - p_2$ – тиск середовища, в яку відбувається екструзія, Па.

Зведемо рівняння (2.33) до лінійного рівняння в часткових похідних другого порядку в площині ОХУ:

$$\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} = -\frac{\Delta p}{l}, \quad (2.35)$$

Граничною умовою до рівняння (2.35) буде рівність нулю швидкості частинок матеріалу на стінках отвору:

$$v|_c = 0, \quad 0 \leq z \leq l, \quad (2.36)$$

де C – рівняння контуру нормального до осі ОZ перетину, який є направляючою циліндричної поверхні, що обмежує отвір.

Розглянемо окремий випадок контуру C . Нехай контур C являє собою коло (де його параметри змінюються вздовж осі y).

Рівняння, якого в площині ОХУ буде:

$$x^2 + y^2 = R^2 \quad (2.37)$$

Розв'язок рівняння (2.33) задовольняє граничній умові (2.35) має вигляд:

$$v = A \cdot (R^2 - l^2 - r^2), \quad (2.38)$$

Підставляючи в рівняння (2.38) в (2.35) висловимо постійну A :

$$v''_{xx} + v''_{yy} = \frac{\Delta p}{\eta \cdot l}, \quad (2.39)$$

$$-2A - 2A = \frac{\Delta p}{\eta \cdot l} \quad (2.40)$$

Звідси:

$$A = \frac{\Delta p}{\eta \cdot l} \quad (2.41)$$

Отже, швидкість переміщення витіснених частинок через даний отвір матеріалу обчислюється за формулою:

$$v = \frac{\Delta p}{\eta \cdot l} \cdot (R^2 - l^2 - r^2) \quad (2.42)$$

Далі визначимо секундну масову пропускну здатність через отвори матриці.

Визначення продуктивності і кількості отворів в матриці. Враховуючи, що діаметр матриці нам відомий, розрахуємо раціональну кількість отворів в матриці.

Площа круга обчислюється за формулою [106]:

$$S_{омв} = \pi \cdot R^2, \quad (2.43)$$

Позначимо відстань між двома філь'єрами δ_1 . Введемо в розгляд використовувану площу матриці і позначимо через S_1 .

Площа матриці, що використовується обчислюється виходячи з «відступу від краю» (рис. 2.3).

Отже:

$$K_M = \frac{S_1}{\pi \cdot \left(R + \frac{\delta_1}{2}\right)^2}, \quad (2.44)$$

де K_M – кількість отворів в матриці; S_1 – використовувана площа матриці, м²; R – вхідний радіус отвору, м; δ_1 – відстань між двома отворами, м.

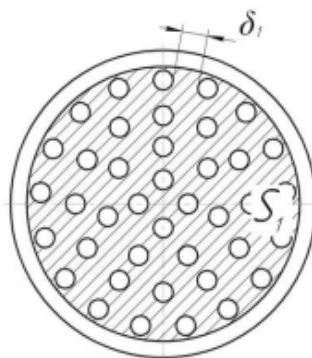


Рисунок 2.3 – Схема матриці екструдера з двома шнеками

Продуктивність через один отвір матриці знайдемо за формулою:

$$Q_{омв} = v \cdot S_{омв} \quad (2.45)$$

Підставляємо (2.42) і (2.43) в (2.45) і отримаємо об'ємну продуктивність через одну філь'єру:

$$Q_{омв} = \frac{\Delta p}{\eta \cdot l} \cdot (R^2 - l^2 - r^2) \cdot \pi \cdot R^2, \quad (2.46)$$

Об'ємна продуктивність через матрицю визначається за формулою:

$$Q_M = K_M \cdot Q_{oms} \quad (2.47)$$

Підставляємо (2.44) і (2.46) в (2.447) і отримаємо:

$$Q_M = \frac{S_1}{\pi \cdot \left(R + \frac{\delta_1}{2}\right)^2} \cdot \frac{\Delta p_0}{\eta \cdot l} \cdot (R^2 - l^2 - r^2) \cdot \pi \cdot R^2, \quad (2.48)$$

де Q – продуктивність матриці екструдера, кг/год; S_1 – використовувана площа матриці, m^2 ; R – вхідний радіус отвору, м; δ_1 – відстань між двома отворами, м; Δp_0 – різниця тисків на вході і на виході з отвору, Па; η – в'язкість, Па·с; l – довжина отвору матриці, м; r – вихідний радіус отвору, м.

2.3 Визначення номінальної потужності екструдера

Розрахунок потужності екструдера з двома шнеками є найбільш відповідальним, оскільки він пов'язаний з раціональним вибором приводу, заощадження електроенергії та необхідними силовими розрахунками. Рівняння для визначення потужності можна отримати виходячи з наступної формули:

$$N = M_{кр} \cdot \omega, \quad (2.49)$$

де N – потужність, що витрачається на пресування в екструдері, кВт; $M_{кр}$ – крутний момент, Н·м; ω – кутова швидкість, s^{-1} .

Крутний момент кожного витка шнека екструдера визначається, виходячи з умови рівномірного розподілу тиску по всьому перетину. У цьому випадку на кожну елементарну площадку гвинтової поверхні шнека діє сила осевого опору.

Для визначення опору руху в'язких матеріалів по гвинтовим каналах шнека до кожного елементарного кільця гвинтової поверхні витка шнека необхідно докласти елементарний момент зусилля:

$$dM = 2 \cdot \pi \cdot p \cdot \operatorname{tg} \varphi \cdot \psi^2 \cdot d\psi = p \cdot t \cdot \psi \cdot d\psi, \quad (2.50)$$

де dM – елементарний момент зусилля; p – тиск в кожному витку шнека уздовж осі камери екструдера з двома шнеками (тиск між витками шнека), Па; φ – кут нахилу гвинтової лінії, град; ψ – радіус кривизни шнека, м; t – крок між витками шнека, м.

Звідки крутний момент витка шнека:

$$M_{кр} = p \cdot t \cdot \int_{\psi_{min}=0.5d}^{\psi_{max}=0.5D} \psi \cdot d\psi = \frac{p \cdot t \cdot (D^2 - d^2)}{8}, \quad (2.51)$$

де D – діаметр шнека, м; d – діаметр вала шнека, м.

Формулу (2.51) можна представити в іншому вигляді:

$$M_{кр} = \frac{p \cdot S_b \cdot D \cdot t g}{2} \approx \frac{p \cdot \pi \cdot D^2 \cdot h \cdot t g \varphi}{2}, \quad (2.52)$$

де $S_b = \pi \cdot D \cdot h$ – площа перерізу витка шнека, м²; $S_b \approx \frac{\pi \cdot (D^2 - d^2)}{4}$ при малій висоті витків h , см.

Максимальний утримуючий момент комбікормової суміші на внутрішній поверхні циліндра екструдера з двома шнеками в межах кожного витка шнека:

$$M_{y\partial} = \frac{\pi \cdot D^2 \cdot t \cdot \tau}{2}, \quad (2.53)$$

де τ – максимальне напруження зсуву комбікормової суміші, Па.

Максимальний тиск, що створюється кожним витком шнека, можна визначити з рівності крутного і утримує моментів:

$$M_{кр} = M_{уд}. \quad (2.54)$$

Кутова швидкість є псевдовектором, напрямок якого залежить від напрямку обертання і визначається за правилом правого гвинта і визначається за формулою:

$$\omega = \frac{v}{R}, \quad (2.55)$$

де v – лінійна швидкість, м/с; R – радіус шнека, м.

Підставляючи (2.53) і (2.55) в (2.49) отримаємо рівняння потужності, що враховує реологічні властивості комбікормової суміші:

$$N = \frac{\pi \cdot D^2 \cdot t \cdot \tau \cdot v}{2 \cdot R}, \quad (2.56)$$

Враховуючи, що в'язкість описується законом (2.14), рівняння (2.56) набуде вигляду:

$$N = \frac{\pi \cdot D^2 \cdot t \cdot \mu \cdot (\dot{\gamma}) \cdot v}{2 \cdot R}, \quad (2.57)$$

де D – діаметр шнека, м; t – крок між витками шнека, м; $\dot{\gamma}$ – швидкість деформації, с⁻¹; μ – коефіцієнт консистенції матеріалу, Па·сⁿ; n – індекс течії; v – лінійна швидкість, м/с; R – радіус шнека, м.

2.4 Висновки з розділу

1. Двошнекові екструдери виявляють численні переваги порівняно з одношнековими моделями, зокрема забезпечують підвищений тиск при видавлюванні комбікормової суміші, рівномірний вихід без пульсацій, а також здатність до обробки матеріалів за один прохід. Дослідження продуктивності таких екструдерів, яке базується на розрахунках об'ємів, що формуються шнеками, дозволяє створити ефективні моделі, які враховують співвідношення між обсягами витків шнеків, перекриттям та робочими параметрами. Використовуючи відповідні формули для розрахунку продуктивності, можна оптимізувати технологічні процеси та покращити якість кінцевої продукції. Визначення раціональних геометричних параметрів отворів матриці екструдера також є критично важливим для досягнення стабільної швидкості потоку та високої якості гранул, що підкреслює необхідність подальшого дослідження та удосконалення технологій екструзії в харчовій промисловості.

2. Визначення номінальної потужності екструдера з двома шнеками є ключовим етапом у проектуванні та оптимізації екструзійних процесів. Розрахунок потужності базується на основі взаємозв'язку між крутним моментом та кутовою швидкістю, що дозволяє оцінити ефективність обраного приводу та енергетичні витрати. Формули, представлені у цьому розділі, враховують реологічні властивості комбікормової суміші, включаючи тиск, швидкість деформації та коефіцієнт консистенції, що забезпечує точність розрахунків та адаптацію до різних умов експлуатації. Правильне визначення потужності екструдера не тільки сприяє зменшенню енергетичних витрат, але й забезпечує стабільність і якість кінцевого продукту, що робить його важливим аспектом у технологічному процесі екструзії.

3 МЕТОДИКА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ПРОЦЕСУ ЕКСТРУЗІЇ КОМБІКОРМІВ

3.1 Визначення кінетики деформації комбікормової суміші

При гранулюванні комбікормової суміші необхідно знати кінетику її деформації, оскільки це пов'язано з релаксаційними процесами і кінцевою щільністю гранул.

З графіків, було встановлено, що межа плинності комбікормової суміші становить ~ 3 МПа.

Відомо, що, якщо до зразка прикласти напругу більше межі текучості, тобто $\sigma > \tau$ і записати залежність між деформацією, прикладеною напругою і часом впливу зусилля (напруги) то ця крива і буде відображати кінетику деформації комбікормової суміші. Для знаходження такої залежності використовувалась експериментальна установка, показана на рис. 3.1.

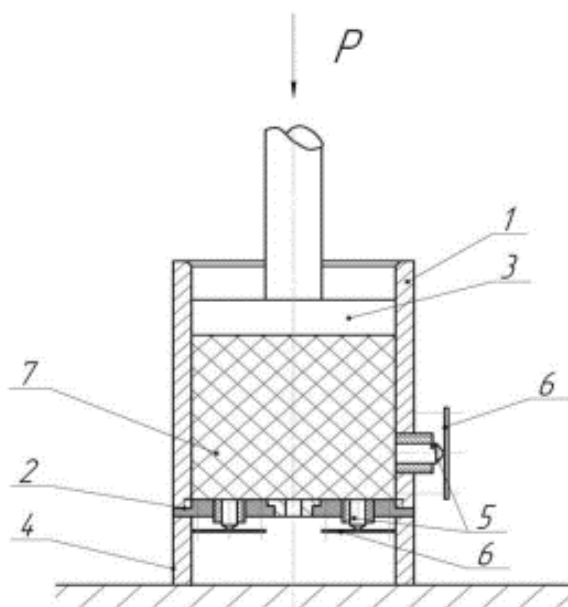


Рисунок 3.1 – Схема компресійної камери: 1 – циліндр; 2 – дно;
3 – поршень; 4 – опора; 5 – поршні тензорних елементів; 6 – тензорні балки;
7 – пресований матеріал

Модель представляла собою компресійну камеру із суцільним циліндром 1 і

суцільним дном 2, з місцем для заміни різних видів отворів 3 або заглушки.

На рис. 3.2 і 3.3 представлені фото фізичної моделі і загальний вигляд лабораторної установки рис. 3.4.



Рисунок 3.2 – Фото компресійної камери в розібраному вигляді:
1 – циліндр; 2 – суцільне дно з датчиками; 3 – отвір для датчиків

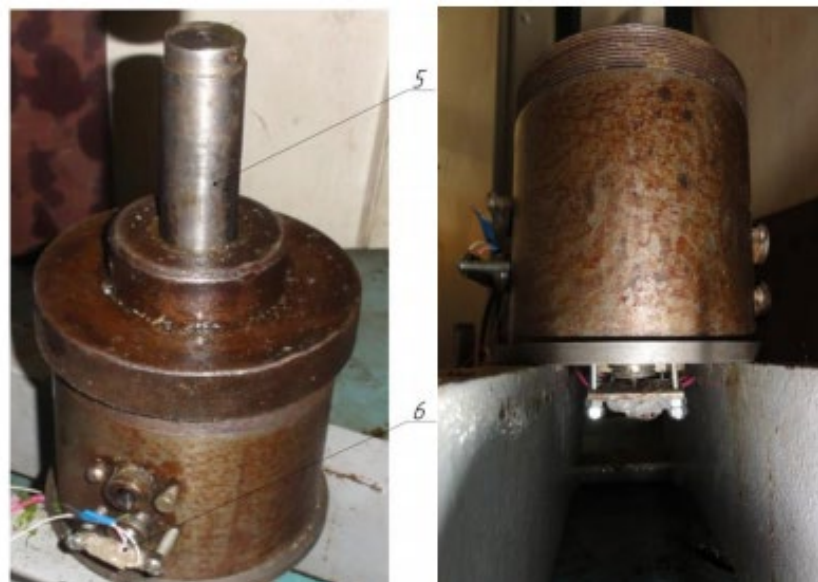


Рисунок 3.3 – Фото компресійної камери в зборі:
5 – поршень; 6 – тензорні елементи.

Компресійна камера складається з циліндра 1, суцільного дна 2, поршня 3, що створює тиск і тензорних елементів 6. Компресійна камера встановлена на ручний гідравлічний прес, що розвиває тиск до 5 МПа.

Обробка сигналу з тензодатчиків здійснювалася за допомогою підсилювача 8АНЧ-23, плати АЦП «L-CARD L-780», персонального комп'ютера. Реєстрація осцилограм виконувалася програмою «L-Graph II» (рис. 3.5).



Рисунок 3.4 – Лабораторна установка загальний вигляд:

1 – гідравлічний прес; 2 – манометр; 3 – поршень; 4 – циліндрична камера; 5 – дно; 6 – датчик

Суміш з щільністю 650 кг/м^3 завантажувалася в камеру. Потім практично миттєво створювався тиск на поршень 5,4 і 3,5 МПа, тобто $\sigma > \tau$ і замірялась зміна деформації. Після припинення деформації тиск знімався і починалась релаксація. Час витримки суміші під навантаженням становило (10-15) секунд.

Результати обробки осцилограми показані на рис. 3.5.



Рисунок 3.5 – Тензовимірювальна апаратура:

1 – 8-канальний підсилювач 8АНЧ-23; 2 – системний блок ПК з платою АЦП «Л Card L-780»; 3 – монітор

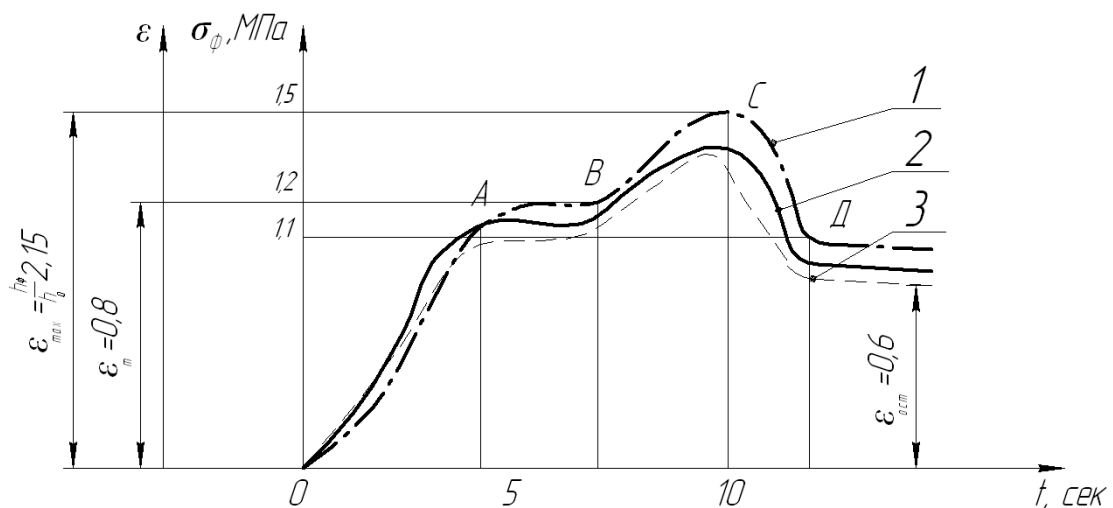


Рисунок 3.6 – Кінетика деформації комбікормової суміші з ПЗК:

ε – відносна деформація; t – час витримки під тиском; σ_{ϕ} – фактичний тиск суміші, МПа; 1 – кінетика деформації при $\sigma = 5,08$ МПа; 2 – кінетика деформації при $\sigma = 5,04$ МПа; 3 – кінетика деформації при $\sigma = 4,92$ МПа; ε_m – сумарна деформація пружної і пластичної деформації; $\varepsilon_m = \frac{h_{\phi}}{h_0} \approx 0,8$; ОА – ділянка

пружної післядії; $\varepsilon_{ост}$ – кінцеве значення залишкової деформації після відновлення пружної деформації; ε_{max} – максимальна відносна деформація.

Аналіз інформації наведеної на рис. 3.6 показує, що:

- ідеально пружної деформації немає; тому графік реального процесу починається з нуля;
- має місце явище плинності (ділянка АВ);
- незворотна деформація (BC);
- релаксація (ділянка CD) і суміш виходить на стабільний рівень.

З графіка на рис. 3.10 видно, що максимальний тиск пресувального органу повинно знаходитися в межах 1,5 МПа, залишкова деформація припиняється при 1,1 МПа. Ці дані повинні бути покладені в основу параметрів пресувального пристрою.

Так само з'являється можливість перерахувати майбутню умовну щільність гранул. Результати показані на рис. 3.7.

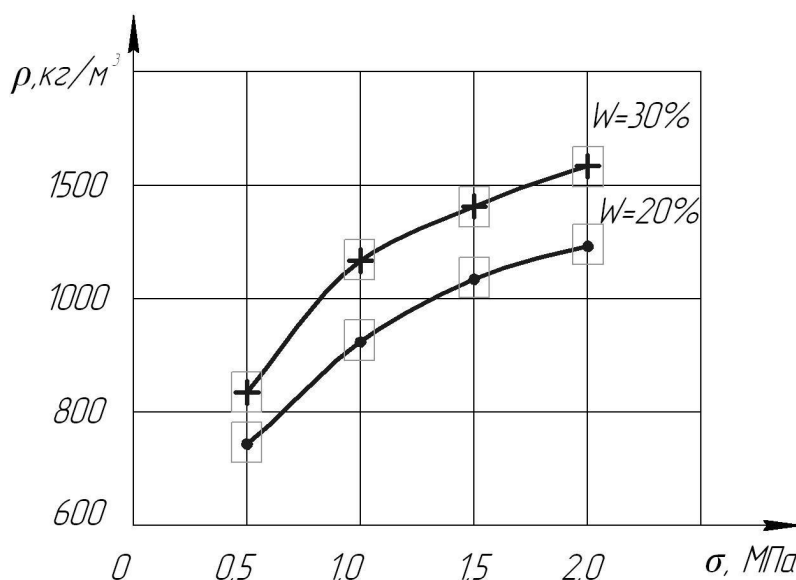


Рисунок 3.7 – Залежність щільності гранул від напружень. Геометричний розмір маркера відповідає похибці вимірювань ($\Delta=10\%$)

3.2 Дослідження процесу гранулювання через отвори різної форми

При теоретичних дослідженнях була визначена раціональна форма отвору матриці, при якій буде рівномірний тиск по всій довжині отвору. Це повинно зменшити загальний опір переміщенню суміші і поліпшити якість гранул [86,92].

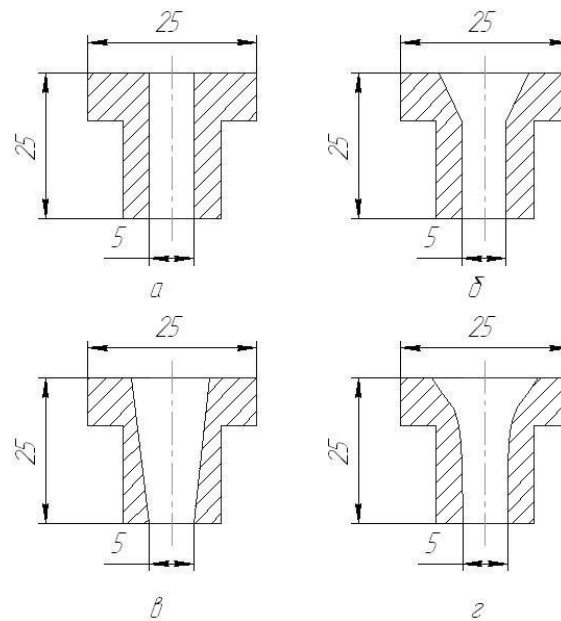


Рисунок 3.8 – Форма отворів для гранулювання: а – циліндрична; б – циліндрична з конічним входом; в – конічне звуження; г – експериментальна

Для перевірки цієї гіпотези були виготовлені експериментальні плашки з різними формами гранулюючих отворів, зображених на малюнках 3.8 - 3.9.



Рисунок 3.9 – Фото плашок з гранулюючими отворами: а – циліндрична; б – циліндрична з конічним входом; в – конічне звуження; г – експериментальна

Експерименти проводилися на установці, показаної на рисунку 3.4. В циліндрі було встановлено дно з різьбою, в яку загвинчувалась плашка з досліджуваним отвором. За допомогою гідравлічного преса створювався тиск 5 МПа, замірявся час витіснення об'єму суміші ($V=700 \text{ см}^3$) і одночасно за допомогою тензометричних датчиків записувалося тиск [86]. Узагальнені отримані результати наведені в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 – Результати експерименту

Вид отвору	Тиск, МПа	Час закінчення, с
Циліндричне	5,18±0,1	60
Циліндр з конічним входом	5,14±0,1	50
Конічне	5,1±0,1	45
Експериментальне	5,01±0,1	40

З представлених даних видно, що, як і передбачалося, експериментальна форма отвору краща за показниками, ніж інші випробувані. Тиск, що розвивається нижче, ніж у інших і час менший, що, природно, позначиться на продуктивності, тобто запропонована гіпотеза підтвердилася.

Важливим показником є якість гранул. Отримані гранули досліджувалися на крихкість (по ГОСТ 28497-90), ступінь набухання (по ГОСТ 22834-87), щільність (по ДСТУ 51899-2002) і водостійкість (по ГОСТ 28758 – 97). Узагальнені результати і похибки цих вимірювань, провели належну статистичну обробку і представлені в таблицях 3.2-3.3.

Таблиця 3.2 – Експериментально визначені показники якості гранул

Найменування	Тип отворів			
	Циліндр. профіль	Циліндр. профіль з коніч. входом	Конічний профіль	Експеримент. профіль
Діаметр гранул, мм	5±0,1	5±0,1	5±0,1	5±0,1
Крихкість, %	2,1±0,05	2,4±0,05	2,5±0,05	2,1±0,05
Ступінь набухання, %	34±3	34±3	46±3	34±3
Щільність, г/дм ³	1393±10	1235±10	1108±10	1392±10

Таблиця 3.3 – Середні значення водостійкості гранул

Втрати, %	Час руйнування, хв.			
	Тип отворів			
	Циліндр. профіль	Циліндр. профіль з коніч. входом	Конічний профіль	Експеримент. профіль
	Діаметр гранул			
	5	5	5	5
5	5,5	5	5	6
15	165	16	16	17

25	25	26	26	27
50	43	42	42	44
75	52	50	51	56

Висновки щодо якості:

- отримані гранули відповідають технологічним вимогам (описані в 1-му розділі);
- крихкість отриманих гранул не перевищує 5%, що відповідає ГОСТ 28497-90;
- отримані гранули, по щільності відповідають специфіці даному годуванню риби;
- отримані експериментальні гранули краще зберігають свою структуру і можуть знаходитися в воді на 10 % довше в порівнянні з іншими.

З представлених результатів видно, що гранули, отримані через експериментальний отвір, відповідають вимогам щодо якості. Однак кінцевий результат буде видно при роботі екструдера з матрицею з експериментальними отворами.

3.3 Дослідження технологічного процесу екструзії

Метою цього розділу є пошук раціональних параметрів процесу екструзії комбікормів, із застосуванням протеїнової зеленої пасти, шляхом варіювання такими факторами як:

- число обертів шнеків,
- діаметр отворів матриці,
- вологість комбікормової суміші.

Функції відгуку – енергоємність і продуктивність [55,56,59,62,74,83,95].

Отримані гранули після екструзії повинні відповідати технологічним вимогам наведені в таблиці 3.4.

Таблиця 3.4 – Технологічні вимоги до отриманих гранул

Найменування показника	Характеристика і норми
Масова частка вологи, % не більше	13,5 (після сушіння)
Діаметр гранул, мм	2,5-4,7 (до 10)
Довжина гранул, мм не більше	Два діаметра
Крихкість гранул, %, не більше	5
Прохід через сито з отворами діаметром 2 мм, %, не більше	5
Водостійкість гранул, хв, не менше	15
Здатність розбухати гранул, хв, не менше	25

Першим завданням була перевірка теоретичних залежностей на предмет їх адекватності реальним процесам, що відбуваються в екструдері.

Фактори, що впливають на досліджуваний процес представлені в таблиці 3.5.

Таблиця 3.5 – Фактори, що впливають на процес

№	Назва	Розмірність	Позначення	Діапазон
Керовані фактори				
1	Діаметр отворів матриці	мм	d	2...10
2	Частота обертання шнека	хв ⁻¹	n	100...200
3	Вологість комбікорму	%	W	26...43

Планування експерименту проводилося на основі композиційного плану експерименту другого порядку. Величина зіркових точок обрана з умови рототабельності плану і для матриці виду 2^3 має величину 1,682.

Рівні факторів та інтервали їх варіювання в закодованому вигляді представлені у таблиці 3.6.

Таблиця 3.6 – Рівні факторів та інтервали варіювання

Фактори		Рівні					I	Розмірність
		-1,682	-1	0	1	1,682		
d	x ₁	2,0	3,6	6,0	8,4	10,0	2,4	Мм
n	x ₂	99,5	120	150	180	200,5	30	хв ⁻¹
W	x ₃	26,6	30	35	40	43,4	5	%

Поєднання рівнів факторів при проведенні експерименту наведено в матриці планування. Послідовність проведення дослідів рандомізована. Матриця

отримана за допомогою програми статистичної обробки даних STATISTICA 10.0.

Для проведення дослідів за наведеною вище методикою була створена експериментальна установка. Схема її представлена на рисунку 3.10, а на рисунку 3.11 показаний загальний вигляд.

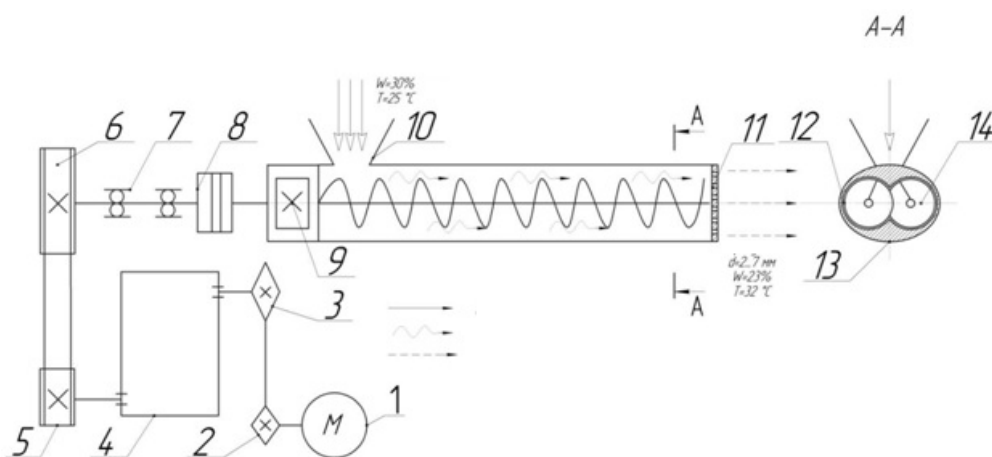


Рисунок 3.10 – Схема експериментальної установки: 1 – електродвигун; 2 – зірочка; 3 – зірочка; 4 – варіатор; 5 – шків; 6 – шків; 7 – підшипники; 8 – муфта; 9 – редуктор; 10 – бункер; 11 – матриця; 12 – шнек; 13 – камера пресування; 14 – шнек

Експериментальна установка складається з наступних основних пристроїв: в якості робочих органів – матриці, два паралельних шнека 12 і 14 з лівою і правою навивкою з міжцентровою відстанню менше, ніж діаметри шнека, забезпечують інтенсивне перемішування сировини і витіснення гранул через матрицю 11. Привід включає варіатор 4 для варіювання швидкості від 0,7 до 1,2 с⁻¹. Набір змінних матриць дозволяє отримувати гранули від 2 до 7 мм діаметром. Прес дозволяє розвинути робочий тиск до 1,5 МПа.

Спочатку готувалася суміш для гранулювання за таким рецептом: протеїнові зелені концентрати 6,9 – 7,3 %; борошно рибне 11,7-18,0 %; борошно м'ясо-кісткове 2,75-5,0 %; дріжджі 9,5-10,0 %; макуха соняшникова 28,0-30,0 %; соєвий шрот 19,0-20,0 %; борошно пшеничне 11,0-11,6 %; вітамін В-4 0,18-0,2 %; премікс 0,18-0,2 %; олія соняшникова 4,75-5,0 %.



Рисунок 3.11 – Загальний вигляд експериментальної установки:

- 1 – завантажувальний бункер; 2 – диск; 3 – пресувальна частина; 4 – варіатор;
5 – головка зі змінними матрицями; 6 – тиристорний регулятор

Потім суміш доводилася до вологості від 20 % до 30 %. Далі встановлювалася матриця з діаметром отворів від 2 до 10 мм.

1. За допомогою варіатора встановлюються оберти рівні 120 хв^{-1} , вологість комбікорму становить 30 %, встановлюється стандартна матриця.

2. Запускався двохшнековий екструдер.

3. Включався запис осцилограми.

4. Наважка з комбікормом, виготовленим згідно з рецептом, масою 30 кг, рівномірно подавалася в завантажувальний бункер.

5. Замірявся час екструзії комбікормів від моменту початку до моменту закінчення виходу пресованих гранул.

6. Зупинявся прес.

7. Зупинявся запис осцилограми, зберігалися дані.

8. Гранули збиралися в окрему підписану ємність і сушилися.
9. Досвід повторювався триразово.
10. Встановлювалися параметри для подальшого дослідження, повторювалися пп.3-10.

4 РЕЗУЛЬТАТ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ПРОЦЕСУ ЕКСТРУЗІЇ КОМБІКОРМІВ

4.1 Обробка експериментальних даних

Експериментальні дослідження проводилися на комбікормовій суміші в відповідності з заданим рецептом. Розрахунки проведені за допомогою програм «Microsoft Excel 2010» і «Statistica 10». В результаті регресійного аналізу отримані регресійні рівняння (3.12), що дозволяють обчислити тиск від заданих параметрів пресування:

$$P = 0,9535 + 0,0064 \cdot d - 0,0019 \cdot d^2 - 0,0008 \cdot n + 0,0001 \cdot n^2 - 0,0153 \cdot W + 0,0002 \cdot W^2 - 0,0001 \cdot d \cdot n + 0,0003 \cdot d \cdot W - 0,0001 \cdot n \cdot W. \quad (4.1)$$

Представимо отримані результати в графічному вигляді. Для цього зафіксуємо один або два фактори, зробивши рівними середнім значенням (рис. 4.1-4.3).

На думку експертів, раціональними параметрами конструкції вважається відповідність максимальної кривизни залежності (3.12) при фіксації пари керуючих параметрів ((d-n), (d-W), (n-W)).

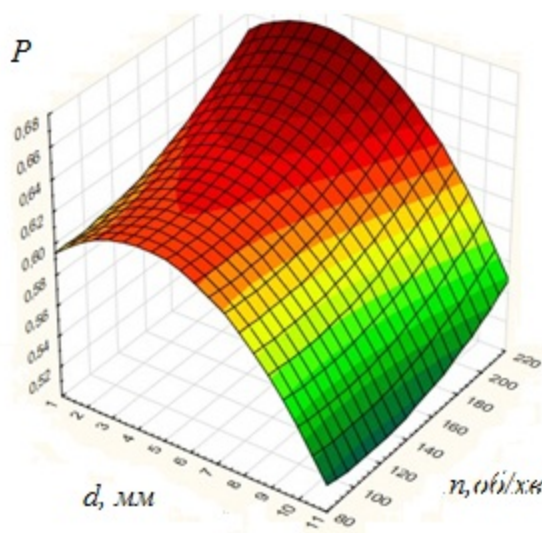


Рисунок 4.1 – Залежність зміни тиску від діаметру отворів матриці і числа обертів шнеків ($W = 30\%$) і постійної подачі $Q=100$ кг/час

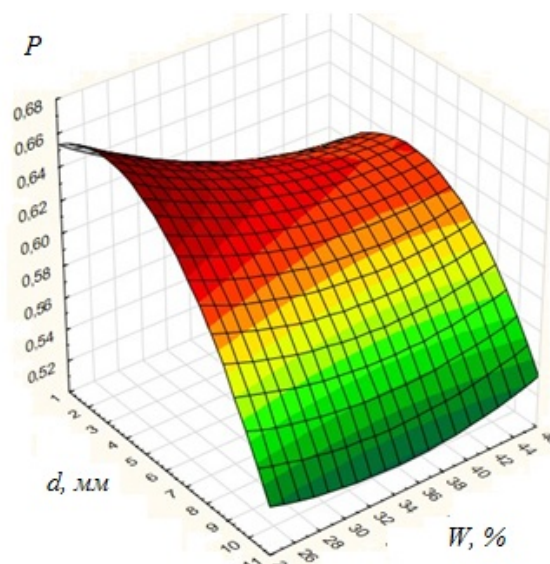


Рисунок 4.2 – Залежність зміни тиску від діаметра отворів матриці і вологості ($n = 120 \text{ хв}^{-1}$) і постійної подачі $Q=100 \text{ кг/год}$

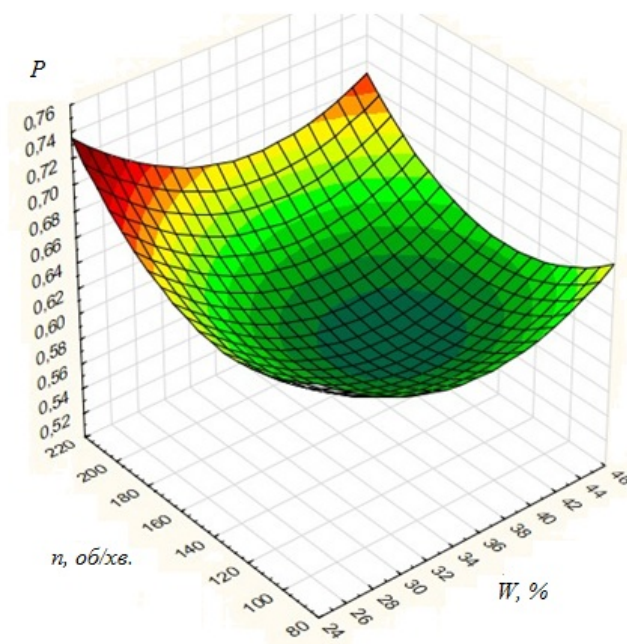


Рисунок 4.3 – Залежність зміни тиску від числа обертів шнеків і вологості ($d=3,6 \text{ мм}$) і постійної подачі $Q=100 \text{ кг/год}$

Порівняння значень тисків теоретичної моделі з експериментальними значеннями представлені в таблиці 4.1.

Таблиця 4.1 – Порівняння значень тисків теоретичної моделі з експериментальними значеннями

№ Експер. точки	Діаметр отворів матриці $d, \text{мм}$	Число оборотів шнеків $n, \text{хв}^{-1}$	Вологіс ть $W, \%$	Тиск $P, \text{МПа}$ (експеримент . значення)	Тиск $P, \text{МПа}$ (теоретич. значення)	Абсол. відхилен ня, $\Delta P, \text{МПа}$	Відносне відхилен ня, %
1	3,6	120	30	0,632	0,802	0,107	17
2	3,6	120	40	0,612	0,679	0,067	11
3	3,6	180	30	0,655	0,721	0,066	10
4	3,6	180	40	0,630	0,7056	0,076	12
5	8,4	120	30	0,583	0,67	0,088	15
6	8,4	120	40	0,579	0,637	0,058	10
7	8,4	180	30	0,602	0,728	0,126	21
8	8,4	180	40	0,593	0,67	0,077	13
9	6,0	150	35	0,613	0,705	0,092	15
10	2,0	150	35	0,617	0,728	0,111	18
11	10,0	150	35	0,546	0,606	0,060	11
12	6,0	99,5	35	0,610	0,689	0,079	13
13	6,0	200,5	35	0,642	0,758	0,116	18
14	6,0	150	26,6	0,639	0,741	0,102	16
15	6,0	150	43,4	0,612	0,794	0,122	20
16	6,0	150	35	0,614	0,749	0,135	22
Середнє						0,093	15,12

Середнє відносне відхилення значень теоретичної моделі від результатів експерименту становить близько 15 %.

Оскільки регресійний аналіз є процедурою раціоналізації, то з графіків (рис. 4.1-4.3) можна визначити раціональні значення параметрів екструдера.

Таким чином, виходить, що раціональним діаметром отвору матриці буде 5 мм, раціональні оберти шнека $\sim 140 \text{ хв}^{-1}$ і найкраща вологість для одержання гранул повинна знаходитися в межах 33 – 34 %.

Істотним показником роботи шнекового екструдера є енергоємність. Тому, перш за все, визначалася витрачена потужність від тих же параметрів, тобто від діаметру отворів матриці, числа обертів шнека і вологості при фіксованій подачі.

Проводилася статистична обробка результатів за методиками, описаними раніше.

Основні результати представлені на графіках (рисунках 4.4-4.5).

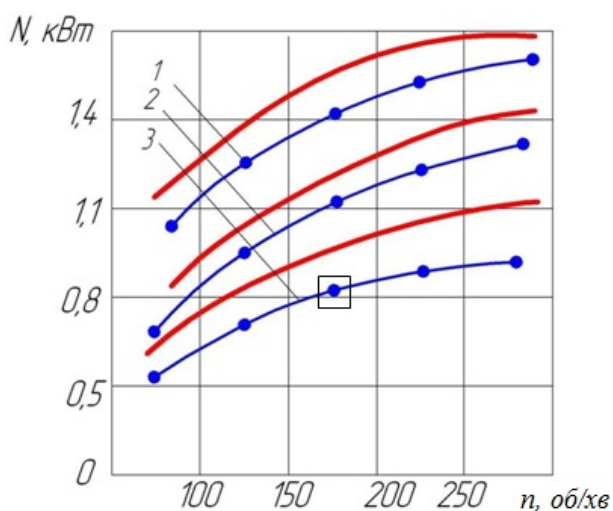


Рисунок 4.4 – Залежність необхідної ефективної потужності від швидкості обертання шнека при постійній подачі $Q=100$ кг/год: \bullet – експериментальні значення; — – теоретичні значення: 1 – вологість $W=25\%$; 2 – вологість $W=30\%$; 3 – вологість $W=35\%$

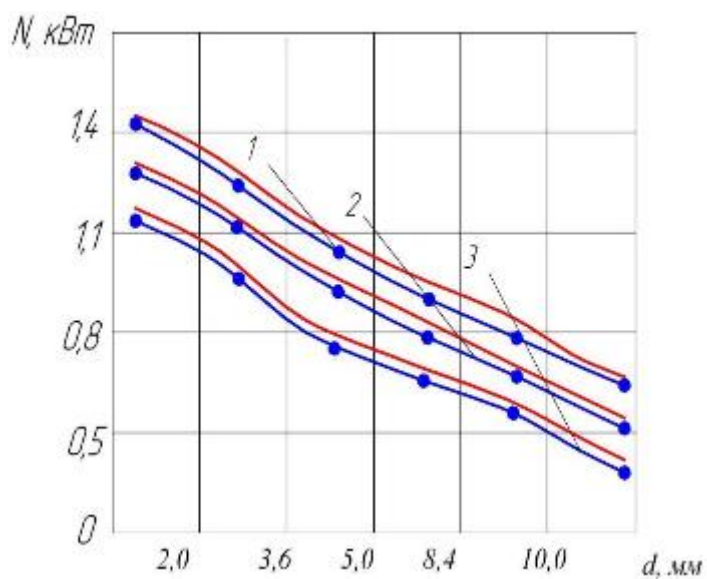


Рисунок 4.5 – Залежність необхідної ефективної потужності від діаметру отворів матриці: \bullet – експериментальні значення; — – теоретичні значення: 1 – вологість $W=25\%$; 2 – вологість $W=30\%$; 3 – вологість $W=35\%$

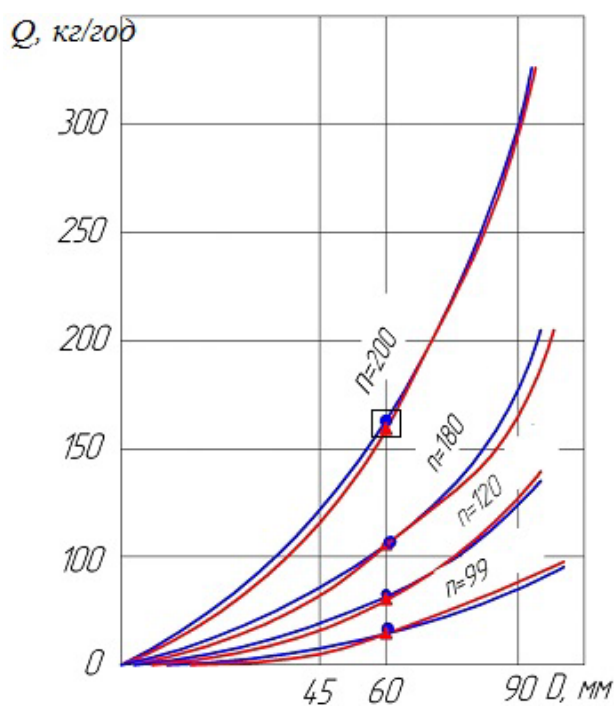
4.2 Визначення продуктивності та енергоємності процесу

Для визначення залежності продуктивності Q і енергоємності N ,

використовували метод подібності і розмінностей.

Цей метод дозволяє правильно визначити раціональні параметри цілої серії подібних машин на підставі дослідження і випробування однієї машини (моделі). Для цього необхідно визначити критерії і масштаби моделювання.

Повні результати моделювання наведені на графіках (рис. 4.6-4.7).

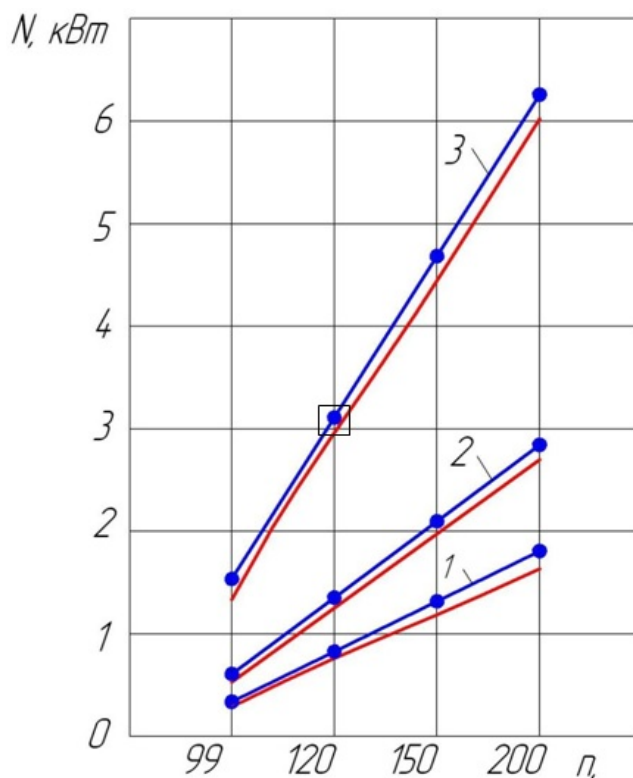


● — експериментальні значення; — теоретичні значення.

Рисунок 4.6 – Залежність продуктивності шнекового екструдера від діаметра шнека з експериментальними і розрахунковими даними, отримані методами моделювання при різних швидкостях обертання шнеків.

Геометричний розмір маркера відповідає значенню похибки вимірювань ($\Delta=5\%$)

Масштаби моделювання досліджуваного екструдера з двома шнеками були визначені на основі результатів дослідження шнекових екструдерів для пластмас. Відповідні співвідношення та значення параметрів, масштабів і функції відгуку представлені в приймаючи умову повної геометричної і кінематичної подібності базового та модельного зразків.



—●— — експериментальні значення; — — теоретичні значення:

Рисунок 4.7 – Залежність споживаної потужності шнекового екструдера від числа обертів шнека: шнек діаметром 45 мм (крива 1), 60 мм (крива 2) і 90 мм (крива 3) за досвідченим і розрахунковими даними, отриманими методом моделювання від швидкості шнеків. Геометричний розмір маркера відповідає похибці вимірювань ($\Delta=5\%$)

4.3 Оцінка якості гранул

Ця оцінка також проводилася з використанням методів планування експериментів і регресивного аналізу.

Функцією відгуку була щільність гранул ρ , змінними параметрами: були діаметр отворів d , число обертів шнеків n і вологість W .

Фотографія отриманих гранул з матрицями різних діаметрів вихідних отворів $d = 2; 3,6; 5; 8,4$ і 10 надана на рис. 4.8.



Рисунок 4.8 – Фотографія отриманих гранул для матриці різних діаметрів вихідних отворів $d = 2; 5$ і 10 мм

Кінцеві рівняння регресії, що зв'язують функції відгуку з змінними параметрами виглядає наступним чином: рівняння для циліндричних отворів і для експериментальних отворів:

$$\rho_S = 1879.07 - 75.06 \cdot d + 3.02 \cdot d^2 - 1.57 \cdot n - 10.77 \cdot W + 0.11 \cdot W^2 + 0.24 \cdot d \cdot W \quad (4.2)$$

$$\rho_N = 1935.12 - 77.31 \cdot d + 3.12 \cdot d^2 - 1.62 \cdot n - 11.09 \cdot W + 0.243 \cdot d \cdot W \quad (4.3)$$

Графічна інтерпретація результатів регресійного аналізу представлена на рис. 4.9-4.10.

Перетином цих поверхонь по різних осях були отримані оцінки якості гранул в залежності від варійованих параметрів, представлених на рис. 4.11-4.13.

В результаті аналізу побудованих графіків 4.11-4.13, отримані наступні висновки: отримані гранули по щільності відповідають ДСТУ 51899-2002; гранули отримані на експериментальній матриці по щільності вище, ніж при використанні стандартної. За аналогічних методикам була проведена оцінка отриманих гранул на крихкість і водостійкість (рис. 4.14-4.19).

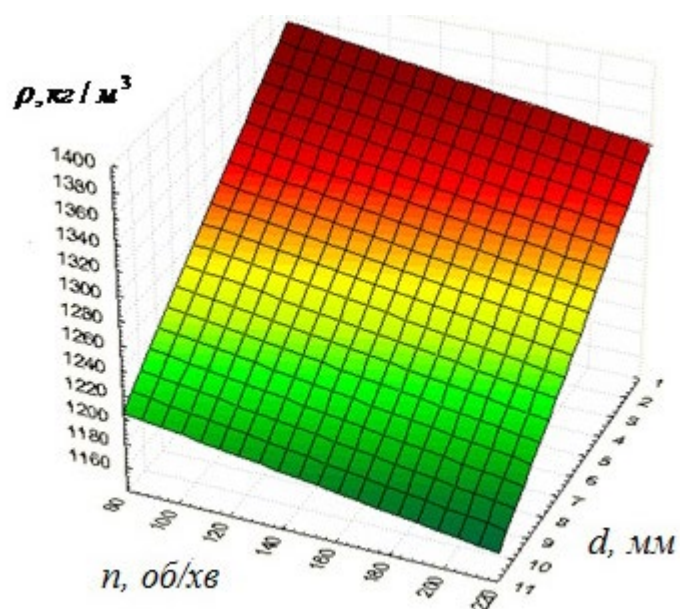


Рисунок 4.9 – Залежність зміни щільності гранул від діаметра отворів стандартної матриці і числа обертів шнеків ($W = 33\%$)

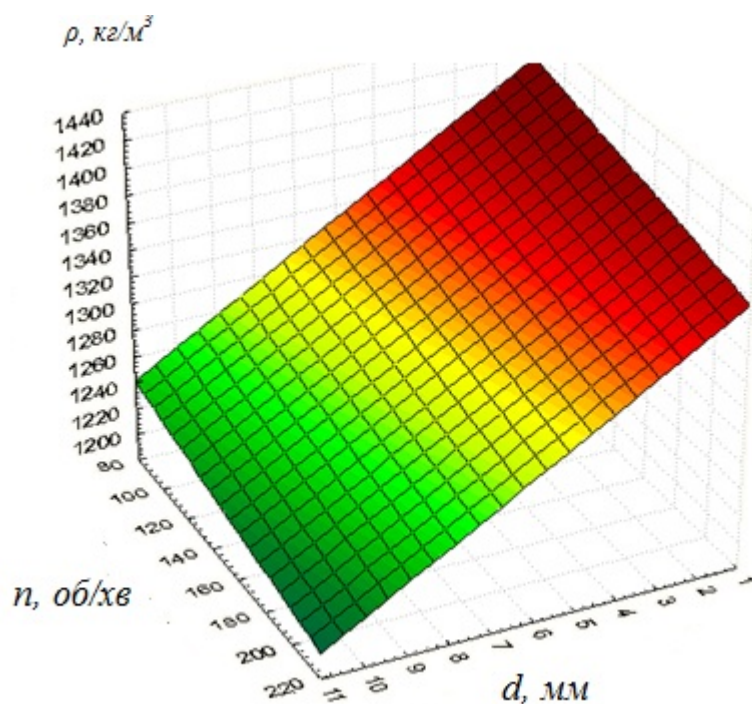


Рисунок 4.10 – Залежність зміни щільності гранул від діаметра отворів експериментальної матриці і числа обертів шнеків ($W = 33\%$).

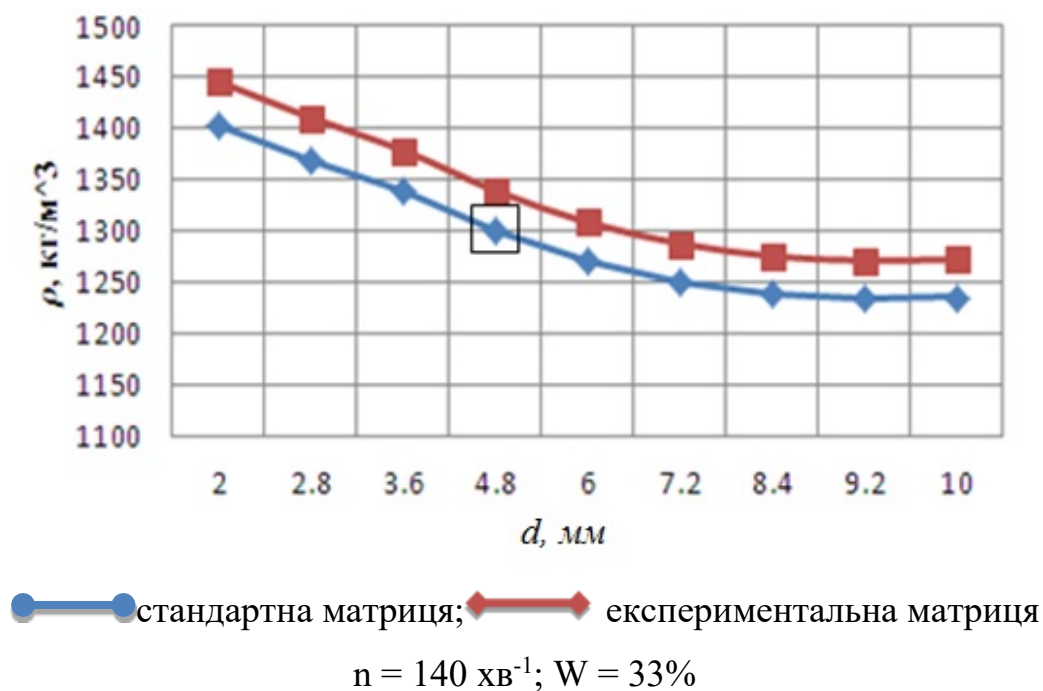


Рисунок 4.11 – Залежність зміни щільності гранул від діаметра отворів матриці. Геометричний розмір маркера відповідає похибці вимірювань

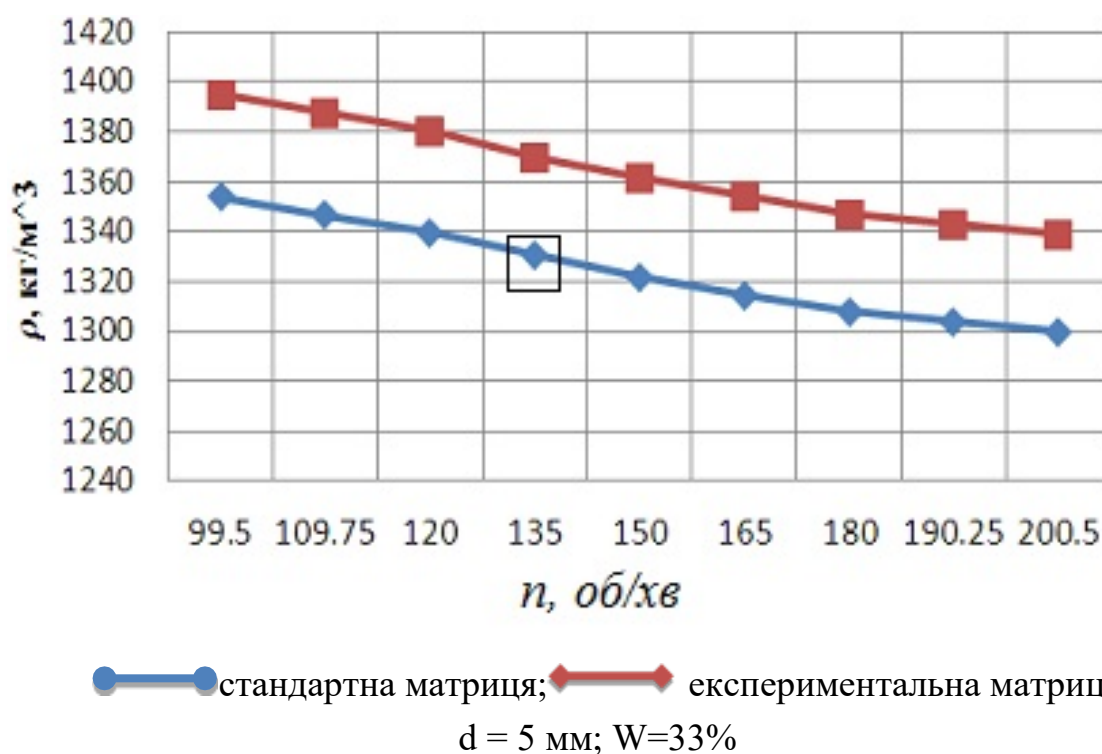


Рисунок 4.12 – Залежність зміни щільності гранул від числа обертів шнеків. Геометричний розмір маркера відповідає похибці вимірювань

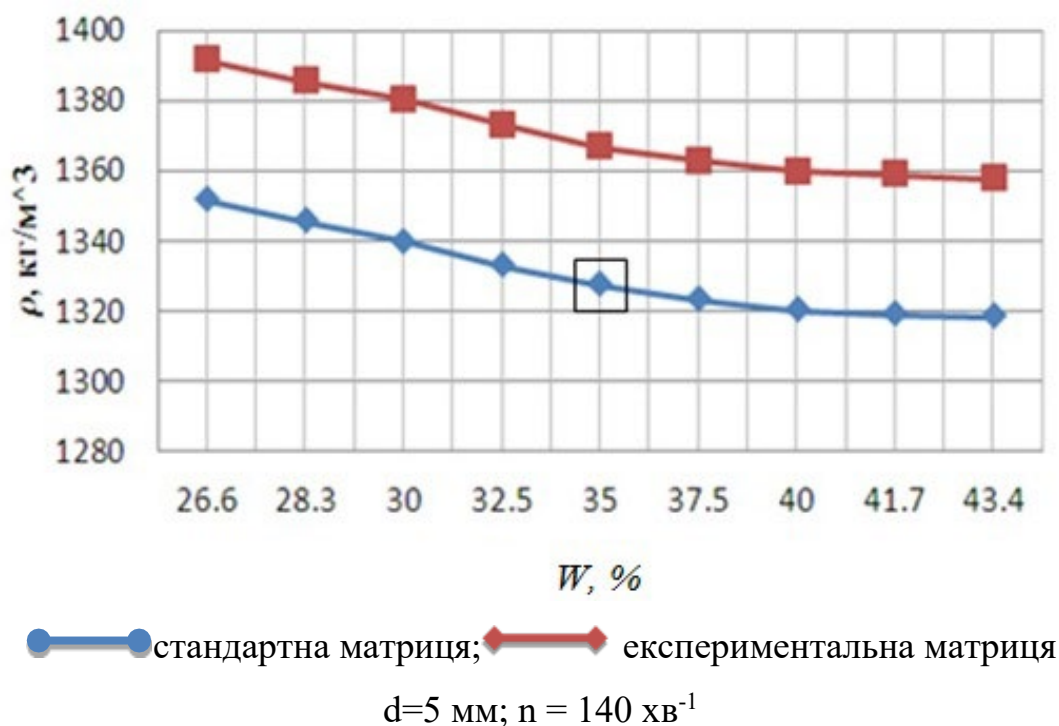


Рисунок 4.13 – Залежність зміни щільності гранул від вологості. Геометричний розмір маркера відповідає похибці вимірювань.

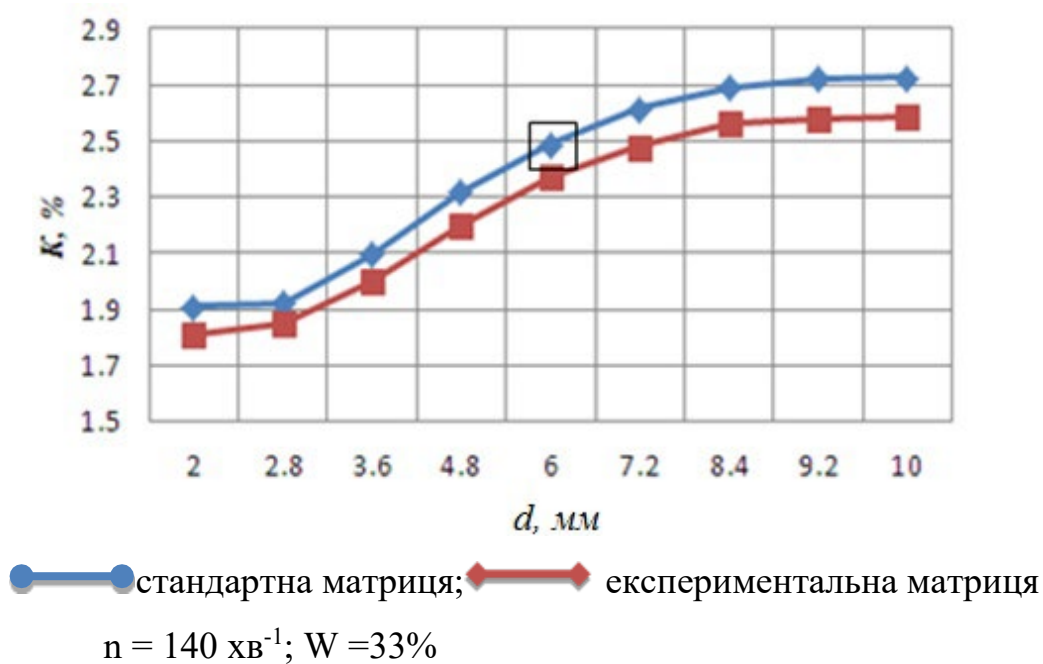


Рисунок 4.14 – Залежність зміни крихкості гранул від діаметра отворів

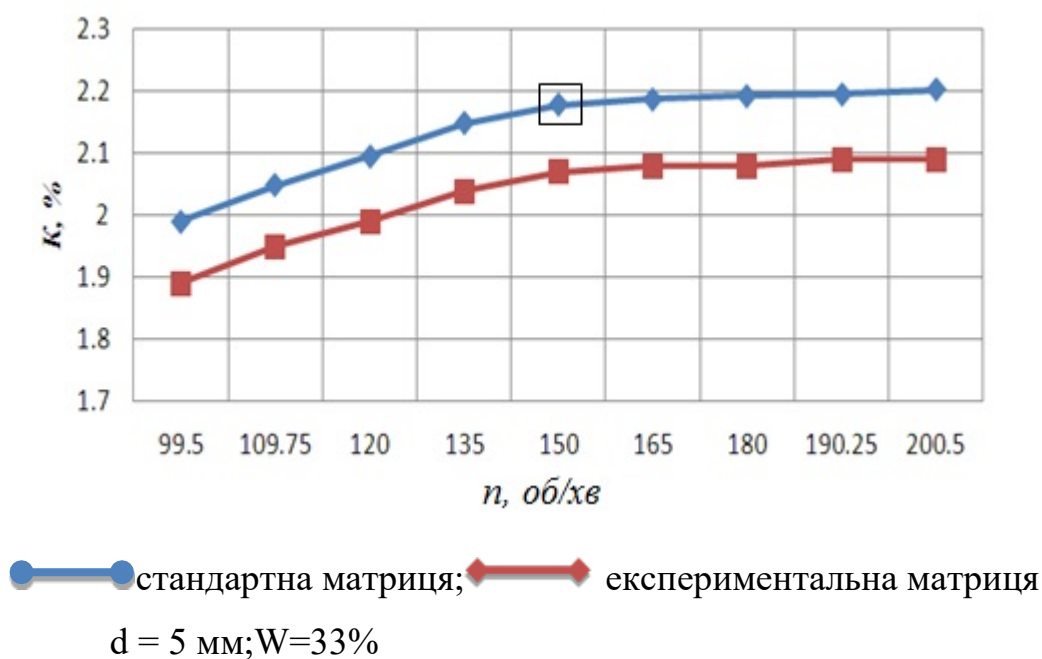


Рисунок 4.15 – Залежність зміни крихкості гранул від числа обертів шнеків

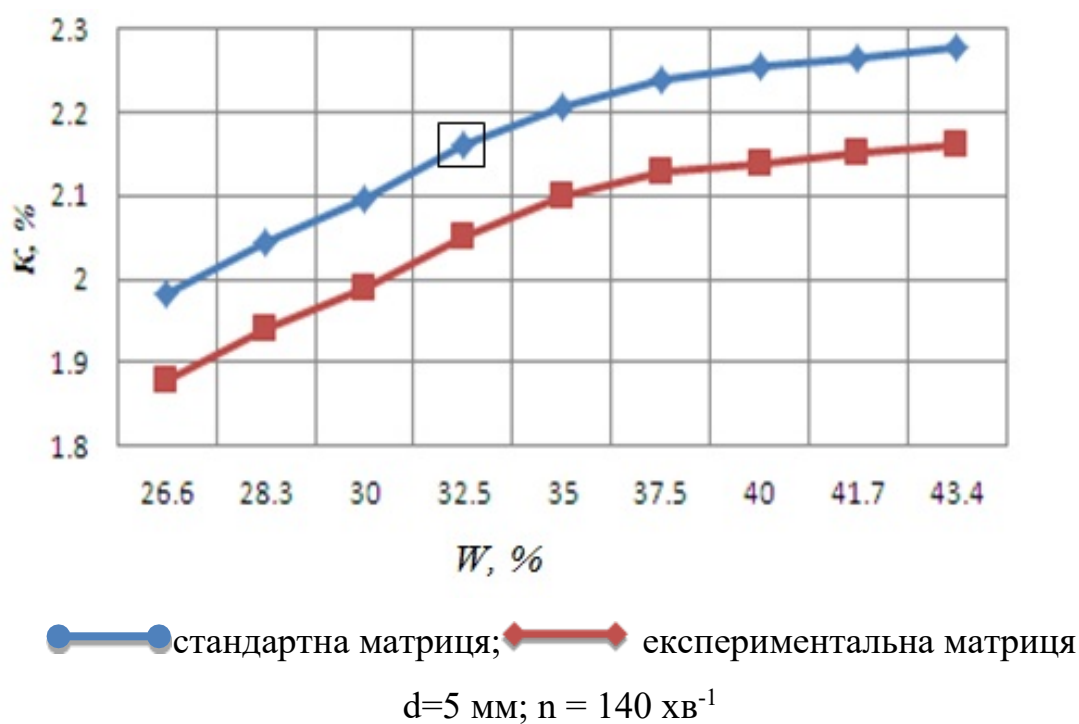


Рисунок 4.16 – Залежність зміни крихкості гранул від вологості

В результаті аналізу побудованих графіків, отримані наступні висновки: крихкість отриманих гранул, через експериментальні і стандартні отвори, не перевищує 5%, що відповідає ГОСТ 284997-90.

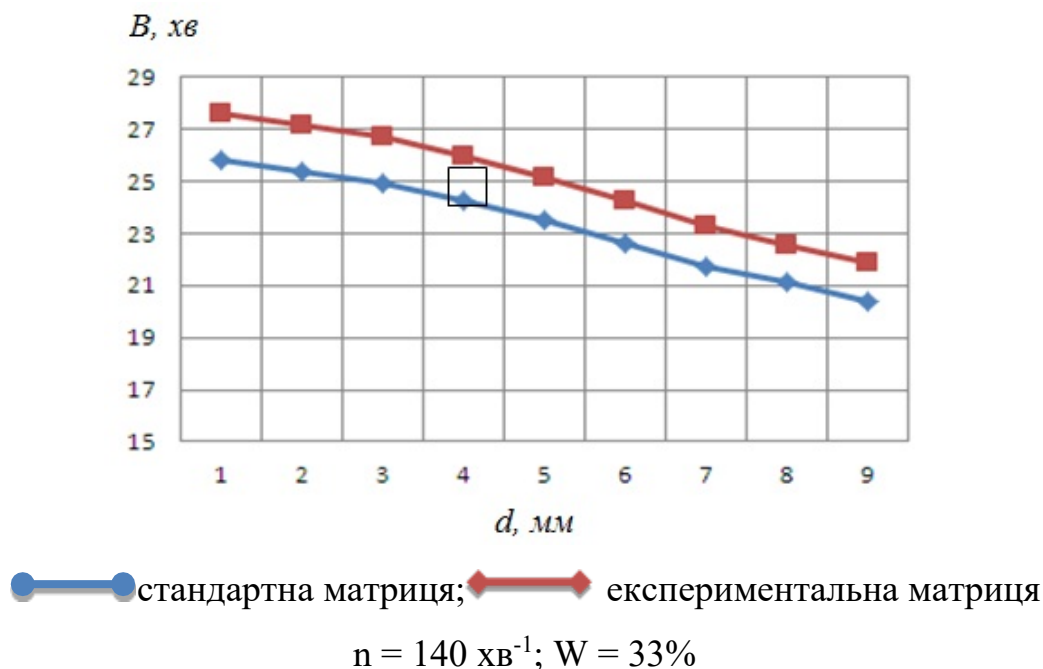


Рисунок 4.17 – Залежність зміни водостійкості гранул від діаметра отворів матриці

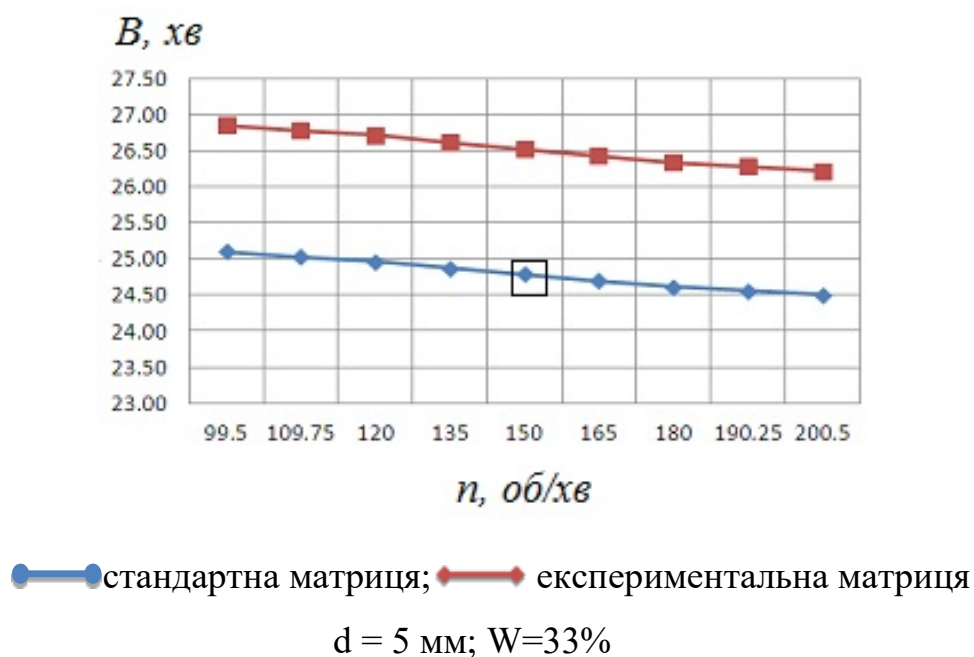


Рисунок 4.18 – Залежність зміни водостійкості гранул від числа обертів шнеків

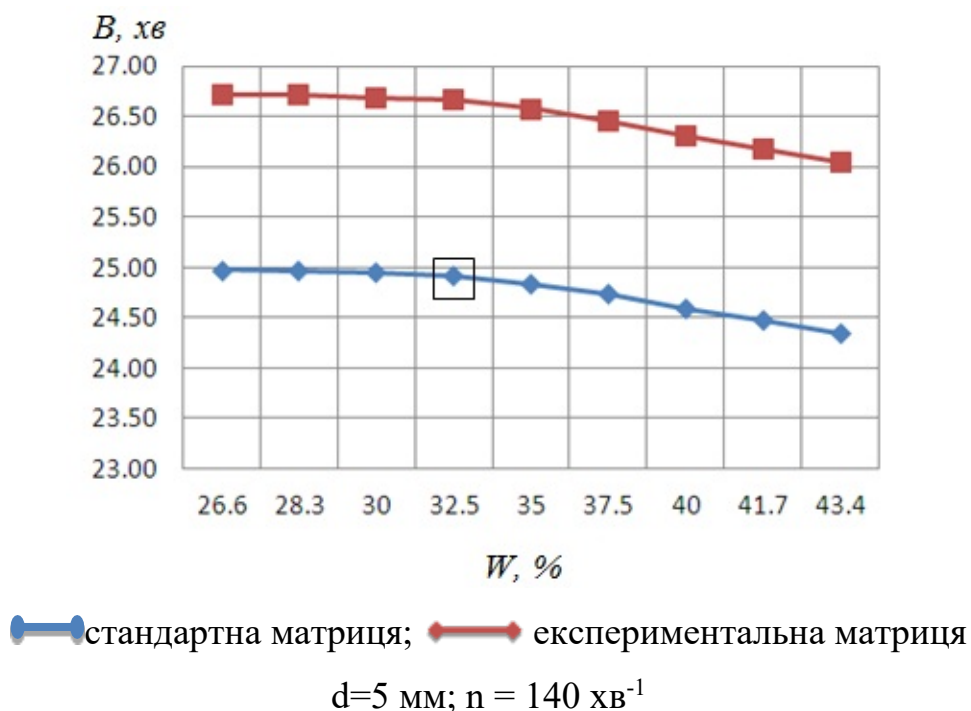


Рисунок 4.19 – Залежність зміни водостійкості гранул від вологості

В результаті аналізу побудованих графіків, отримані наступні висновки: водостійкість отриманих гранул відповідає ГОСТ 28758-87; водостійкість гранул, отриманих через експериментальні отвори на 15-20% вище, ніж у гранул, отриманих через циліндричні отвори. Швидше за все, тут позначається рівномірність тиску по всьому перетину отвору, чого немає у циліндричних отворів.

4.4 Методика інженерного розрахунку двохшнекового екструдера

Ефективність роботи шнекових пресів залежить від геометрії робочих органів, режимів роботи (від тиску пресування, тривалості пресування, швидкості зміни тиску), фізико-механічних властивостей та інших чинників.

Початкові дані:

Q – продуктивність, кг/год;

ρ – щільність гранул, кг/м³.

Розраховуються величини:

Δp – тиск, Па;

n – число оборотів шнека, s^{-1} ;

N – потужність, що витрачається на привід шнека, кВт.

На рис. 4.20 представлена розрахункова схема шнекового екструдера.

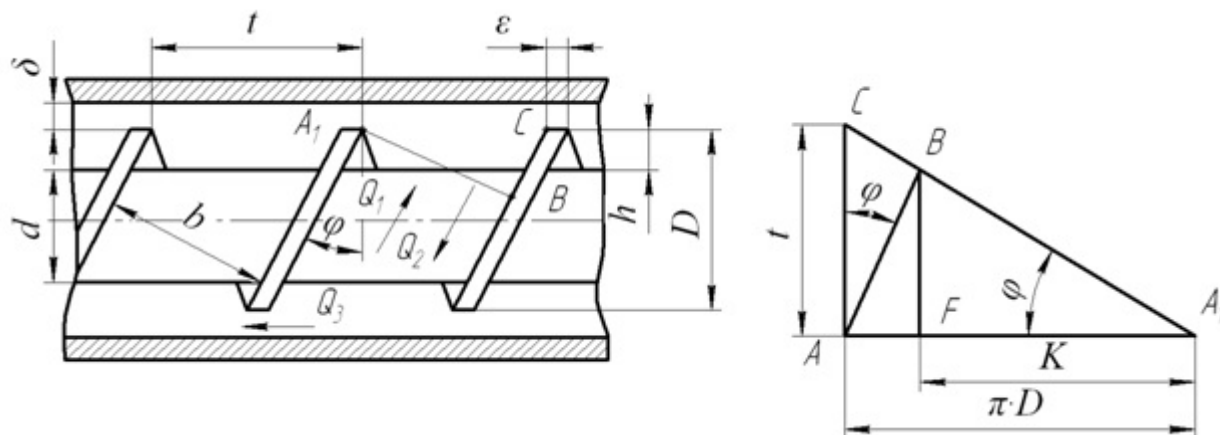


Рисунок 4.20 – Розрахункова схема шнекового екструдера

Для розрахунку продуктивності екструдера використовується формула:

$$Q = \frac{\pi \cdot D \cdot n \cdot h \cdot (t - \varepsilon) \cdot \cos^2 \varphi}{120} \cdot \frac{h^3 \cdot (t - \varepsilon) \cdot \sin^2 \varphi}{24 \cdot n \cdot L} \cdot \Delta p, \quad (4.4)$$

де Q – продуктивність двухшнекового екструдера, кг/год.; D – діаметр шнека, м; n – частота обертання шнеків, $хв^{-1}$; h – глибина нарізки шнека, м; t – крок між витками шнека, м; ε – товщина витка шнека, м; φ – кут нахилу гвинтової лінії, град; η – в'язкість, Па·с; L – довжина шнека від вхідної зони комбікормової суміші до отворів матриці, м; Δp – різниця тисків на вході і на виході з отвору, Па.

У техніці при розрахунку шнекових машин використовується наступна залежність між кінематичною в'язкістю і щільністю:

$$P = \frac{\eta_{\alpha}}{\eta_{\kappa}} \quad (4.5)$$

де ρ – щільність матеріалу, $кг / м^3$;

η_{∂} – динамічна в'язкість матеріалу, Па·с;

η_{θ} – кінематична в'язкість матеріалу, $м^2/с$.

Доцільно застосувати двохшнекову схему преса, враховуючи, що діаметр одного шнека $D = 60$ мм, а глибина нарізки $h = 20$ мм; крок між витками шнека, $t = 60$ мм; товщина витка шнека, $\varepsilon = 15$ мм; кут нахилу гвинтової лінії, $\varphi = 30^\circ$ і довжина шнека $L = 600$.

Кількість обертів шнекового екструдера знаходиться за наступним виразом:

$$n = \frac{60 \cdot v}{\pi \cdot D \cdot \cos^2 \varphi}; \quad (4.6)$$

Цей розрахунок справедливий для одношнекових екструдерів, для розрахунку двошнекових, потрібно враховувати зону перекриття шнеків (в числовому значенні слід збільшити продуктивність на 80%).

Для розрахунку продуктивності матриці максимальної пропускної здатності використовується формула:

$$Q = \frac{S_1}{\pi \cdot (R + \frac{\delta_1}{2})^2} \cdot \frac{\Delta p}{\eta \cdot l} \cdot (R^2 - l^2 - r^2) \cdot \pi \cdot R^2, \quad (4.7)$$

де Q – продуктивність матриці екструдера, кг/год; S_1 – використовувана площа матриці, m^2 ; R – вхідний радіус отвору, м; δ_1 – відстань між двома отворами, м; Δp_0 – різниця тисків на вході і на виході з отвору, Па; η – в'язкість, Па·с; l – довжина отворів матриці, м; r – вихідний радіус отвору, м.

Рівняння для визначення потужності можна отримати виходячи з наступної формули:

$$N = M_{кр} \cdot \omega, \quad (4.8)$$

де N – потужність, що витрачається на пресування в двохшнековому екструдері, кВт; $M_{кр}$ – крутний момент, Н·м; ω – кутова швидкість, s^{-1} .

Вихідні дані для розрахунку двохшнекового екструдера представлені в таблиці 4.2.

Крутний момент визначається за формулою:

$$M_{кр} = \frac{p \cdot \pi \cdot D^2 \cdot h \cdot \operatorname{tg} \varphi}{2} \quad (4.9)$$

де $M_{кр}$ – крутний момент, Н·м; p – тиск в кожному витку шнека уздовж осі камери двохшнекового екструдера (тиск між витками шнека), Па; φ – кут нахилу гвинтової лінії, град; D – діаметр шнека, м; h – глибина нарізки шнека, м.

Кутова швидкість визначається за формулою:

$$\omega = \frac{v}{R} \quad (4.10)$$

де v – лінійна швидкість, м/с; R – радіус шнека, м.

Таблиця 4.2 – Вихідні дані для розрахунку двохшнекового екструдера

Назва параметра	Позначення	Од. вим.	Значення
Діаметр шнека	D	м	0,060
Частота обертання шнека	n	c^{-1}	1,7
Глибина нарізки шнека	h	м	0,0015
Крок між витками шнека,	t	м	0,060
Товщина витка шнека	ε	м	0,005
Кут нахилу гвинтової лінії	φ	$^{\circ}$	8
В'язкість	η	Па·с	700
Довжина шнека	L	м	0,6
Коефіцієнт в'язкості матеріалу	μ	Па·с ⁿ	0,803
Вхідний радіус отвору	R	м	0,0036
Відстань між отворами	δ_l	м	0,005
Довжина отвору	l	м	0,007
Активна площа матриці	S_1	м ²	0,01

4.5 Висновки з розділу

1. Обробка експериментальних даних дозволила провести глибокий аналіз впливу параметрів пресування на тиск у комбікормовій суміші, що підтверджується отриманими регресійними рівняннями. Використання програм «Microsoft Excel 2010» та «Statistica 10» забезпечило точність розрахунків і візуалізацію отриманих результатів. Отримані графіки демонструють, що раціональні значення конструктивних параметрів екструдера включають

діаметр отвору матриці 5 мм, оберти шнека приблизно 140 хв^{-1} та вологість у межах 33–34 %. Середнє відносне відхилення між теоретичними та експериментальними значеннями тиску становить близько 15 %, що вказує на адекватність обраної моделі. Визначення енергоємності в процесі екструзії є важливим аспектом, оскільки впливає на ефективність роботи шнекового екструдера. Таким чином, результати експериментальних досліджень і регресійного аналізу дозволяють оптимізувати процес екструзії комбікормів і підвищити їхню якість.

2. Оцінка якості гранул проведена з використанням методів планування експериментів і регресивного аналізу, що дозволило виявити вплив діаметра отворів, числа обертів шнеків та вологості на щільність гранул. Отримані регресійні рівняння підтверджують, що гранули, вироблені на експериментальних матрицях, мають вищу щільність, ніж ті, що отримані через стандартні отвори, що відповідає вимогам ДСТУ 51899-2002. Аналіз показав, що крихкість і водостійкість гранул також відповідають нормативам: крихкість не перевищує 5%, а водостійкість гранул через експериментальні отвори на 15-20% вища, ніж у гранул стандартних матриць. Ці результати вказують на ефективність експериментальних матриць у підвищенні якості гранул, що може бути пов'язано з рівномірністю тиску, що створюється під час процесу екструзії.

5 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях є важливими аспектами організації виробництва в кормоцехах, зокрема в процесі виготовлення екструдованих кормів. В умовах підвищеної технологічності та механізації, робоче середовище часто супроводжується наявністю небезпечних і шкідливих факторів, які можуть негативно впливати на здоров'я працівників. З огляду на це, забезпечення безпечних умов праці та належна підготовка до надзвичайних ситуацій стають важливими завданнями управління охороною праці в кормоцеху.

Небезпечні та шкідливі фактори в робочому середовищі. В кормоцеху з виробництва екструдованих кормів можуть виникати численні небезпечні та шкідливі фактори, які потребують ретельної оцінки і контролю.

Хімічні фактори. У виробництві кормів використовуються різноманітні хімічні добавки, які можуть викликати небажані реакції у працівників. Неправильне зберігання або використання хімічних речовин може призвести до їх витоку, що загрожує забрудненню повітря та води. Контакт із цими речовинами може викликати алергічні реакції, дерматити або навіть отруєння.

Фізичні фактори. До фізичних факторів належать:

- **Шум:** тривала дія високих рівнів шуму на працівників може призвести до втрати слуху та загального погіршення здоров'я.
- **Вібрація:** при тривалій роботі з вібруючим обладнанням можуть виникати захворювання, пов'язані з вібраційною хворобою.
- **Температура:** робота в умовах високої температури і вологості може призвести до теплових ударів і перегріву організму.

Механічні фактори. Механічні фактори пов'язані з використанням обладнання, зокрема міксерів, екструдерів та інших машин. Неправильне використання або технічні несправності можуть призвести до травмування працівників. Ризики травмування включають затягування одягу в механізми, удари, порізи та падіння.

Психосоціальні фактори. Психосоціальні фактори включають стрес, перевантаження та нестабільний робочий графік. Ці фактори можуть негативно вплинути на психоемоційний стан працівників і призвести до зниження продуктивності праці та підвищення ризику нещасних випадків.

Методи захисту працівників. Для забезпечення безпеки працівників в кормоцеху необхідно впроваджувати комплексні заходи, які охоплюють організаційні, технічні та адміністративні аспекти.

Організація безпечних умов праці. Забезпечення безпечних умов праці є основою для профілактики нещасних випадків. Регулярні перевірки стану обладнання, контроль за дотриманням технологічних процесів, а також моніторинг робочого середовища сприяють зниженню ризиків. Необхідно також розробити план заходів у разі виникнення аварійних ситуацій.

Використання засобів індивідуального захисту (ЗІЗ). Забезпечення працівників засобами індивідуального захисту є обов'язковим. До ЗІЗ належать спеціальний одяг, рукавички, захисні окуляри та респіратори. Вони допомагають знизити ризики травматизму та впливу небезпечних речовин.

Навчання та інструктаж. Регулярне навчання працівників з питань охорони праці є важливим елементом системи безпеки. Всі працівники повинні пройти інструктаж перед початком роботи, де отримують інформацію про небезпечні фактори, правила безпечної роботи та порядок дій у надзвичайних ситуаціях.

Автоматизація процесів. Автоматизація технологічних процесів дозволяє зменшити ручну працю, що, в свою чергу, знижує ризики травматизму. Впровадження новітніх технологій, які зменшують контакт працівників з небезпечними факторами, є важливим кроком у забезпеченні безпеки.

Правила безпечного виконання робіт при роботі з доїльною установкою. При роботі з доїльною установкою важливо дотримуватись наступних правил:

- **Перевірка обладнання:** перед початком роботи працівники повинні перевірити технічний стан доїльної установки, наявність усіх необхідних елементів та запобіжників.

- **Запобігання несправностям:** у разі виявлення несправностей, робота повинна бути зупинена, а спеціалісти повинні бути викликані для усунення проблеми.

- **Чистота на робочому місці:** підтримка чистоти на робочому місці, уникнення скупчення бруду та залишків кормів є важливими для запобігання нещасним випадкам.

- **Засоби індивідуального захисту:** всі працівники повинні носити рукавички, маски та інші засоби захисту, щоб уникнути контакту з небезпечними речовинами та забрудненням.

- **Нагляд за установкою:** не залишати працюючу установку без нагляду, особливо під час виконання технологічних процесів.

Дії під час надзвичайних ситуацій. У разі виникнення надзвичайних ситуацій, таких як:

Пожежа. У разі виникнення пожежі працівники повинні дотримуватись наступних дій:

- **Евакуація:** негайно евакуюватись з приміщення, дотримуючись затвердженого плану евакуації.

- **Виклик пожежної служби:** використовувати телефони для термінового виклику пожежної служби.

- **Використання вогнегасників:** за можливості спробувати загасити вогонь, використовуючи вогнегасники.

Витік небезпечних речовин. У разі витоку небезпечних речовин:

- **Ізоляція місця витоку:** терміново вжити заходів для ізоляції місця витоку, запобігти розповсюдженню небезпечних речовин.

- **Вентиляція:** забезпечити вентиляцію в приміщенні.

- **Евакуація:** при необхідності евакуювати працівників.

Аварії на обладнанні. У разі аварії на обладнанні:

- **Зупинка роботи:** негайно зупинити роботу установок, забезпечити безпеку працівників.

- **Виклик технічного персоналу:** терміново викликати технічний персонал для усунення несправностей.

Забезпечення охорони праці та безпеки в надзвичайних ситуаціях в кормоцеху з виробництва екструдованих кормів є критично важливим аспектом для забезпечення здоров'я працівників та ефективності виробництва. Систематичний підхід до оцінки небезпечних факторів та впровадження заходів безпеки не лише захищає здоров'я працівників, але й підвищує ефективність виробничих процесів. Впровадження належних заходів охорони праці та підготовка до надзвичайних ситуацій є важливими кроками до створення безпечного робочого середовища.

6 ЕКОНОМІЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ ДВОХШНЕКОВОГО ЕКСТРУДЕРА

Дана розробка розрахована на малі фермерські господарства замкнутого циклу по розведенню риби продуктивного віку. При сьогоdnішньому динамічному розвитку фермерських господарств та досить невеликих вкладеннях, така бізнес-ідея обґрунтована і вельми перспективна. На рік у малих фермерських господарствах потрібно не більше 60 тонн комбикормів.

Розрахунок річного економічного ефекту від виробництва і використання двохшнекового екструдера з поліпшеними якісними характеристиками проводиться за формулою:

$$E = \left(3_1 \cdot \frac{B_2}{B_1} \cdot \left(\frac{P_1 + E_H}{P_2 + E_H} \right) + \frac{(I_1^1 - I_2^1) - E_H \cdot (K_1^1 - K_2^1)}{P_2 + E_H} - 3_2 \right) \cdot A_2, \quad (6.1)$$

де 3_1 і 3_2 – приведені затрати відповідно одиниці базової та і нового екструдера,

грн.; $\frac{B_2}{B_1}$ – коефіцієнт, що враховує зростання продуктивності одиниці нового

екструдера в порівнянні з базовим; $\frac{P_1 + E_H}{P_2 + E_H}$ – коефіцієнт, що враховує зміну

терміну служби нового екструдера в порівнянні з базовим; P_1 і P_2 – частка відрахування від балансової вартості на повне відновлення базового і нового екструдера. Розраховуються, як величини, зворотні терміну служби, що визначаються з урахуванням їх морального зносу; E_H – нормативний коефіцієнт ефективності (0,15);

$\frac{(I_1^1 - I_2^1) - E_H \cdot (K_1^1 - K_2^1)}{P_2 + E_H}$ – економія споживача на поточні витрати експлуатації і

відрахування від поточних капітальних вкладень за весь термін служби нового екструдера в порівнянні з базовим, грн.; K_1^1 і K_2^1 – поточні капітальні вкладення споживача при використанні базового і нового екструдера в розрахунку на об'єм продукції, що виробляється за допомогою нового засобу, грн.; I_1^1, I_2^1 – річні експлуатаційні витрати споживача при використанні базового і нового екструдера в

розрахунку на об'єм продукції (роботи), виробленої за допомогою нового обладнання, грн.; A_2 – річний об'єм виробництва нових екструдерів.

Наведені витрати Z являють собою суму собівартості і нормативного прибутку, що визначаються за формулою:

$$z = C + E_H \cdot K \quad (6.2)$$

де Z – приведені витрати одиниці продукції, грн.; C – собівартість екструдера, грн.; K – питомі капітальні вкладення у виробничі фонди, грн.; E_H – нормативний коефіцієнт ефективності капітальних вкладень.

Собівартість машини по чистій масі:

$$C = G \cdot (\lambda \cdot H \cdot k_M + M) + d \quad (6.3)$$

де G – чиста маса машини без додаткових модернізацій, кг ($G = 360$ кг); λ – коефіцієнт конструктивної складності нової машини в порівнянні з аналогічними машинами ($\lambda=1,2$); H – витрати на виробництво, що припадають на 1 кг чистої маси однотипної за технологією машини, грн. ($H=152$); k_M – коефіцієнт зміни H , в залежності від обсягу випуску машини ($k_M = 1,416$); M – вартість 1 кг чистої маси матеріалів, що входять в машину, грн. ($M = 100$); d – вартість вузлів і деталей в оптових цінах з додаванням витрат на транспортно-заготівельні витрати, грн. ($D = 30500$).

$$C_{\text{нов}} = G \cdot (\lambda \cdot H \cdot k_M + M) + d = 360 \cdot (1,2 \cdot 152 \cdot 1,416 + 100) + 122000 = 250980 \text{ грн.}$$

В якості базового обладнання обраний стандартний екструдер. Вихідні дані для розрахунку наведені в таблиці 4.2.

Таблиця 4.2 – Вихідні дані для розрахунку

№	Найменування	Одиниці вимірювання	Базовий	Новий
1	Продуктивність	кг/год.	90	100
2	Питома витрата енергії	кВт·год/кг	0,25	0,2
3	Річний режим роботи	год.	600	600
4	Вартість однієї кВт·год енергії	грн.	3,6	3,6
5	Вартість екструдера	тис. грн.	320	252
6	Монтаж обладнання	%	10	10
7	Норма відрахувань на капітальний і поточний ремонт	%	14,8	14,8

Річний об'єм виробництва комбікормів B :

$$B_1 = 360 \cdot 600 = 216000 \text{ кг}; \quad B_2 = 400 \cdot 600 = 240000 \text{ кг}.$$

Капіталовкладення при використанні базового і нового екструдера.

1. Витрати на монтаж устаткування Z_M :

$$Z_{M1} = 320 \cdot 0,1 = 32,0 \text{ тис. грн.}; \quad Z_{M2} = 252 \cdot 0,1 = 25,3 \text{ тис. грн.}$$

Капітальні вкладення споживача складаються тільки з витрат на монтаж устаткування.

$$Z_1 = 32,0 \text{ тис. грн.}; \quad Z_2 = 25,2 \text{ тис. грн.}$$

2. Експлуатаційні витрати при використанні базового і нового екструдера:

а) Витрати на електроенергію:

$$Z_{E1} = 360 \cdot 600 \cdot 0,25 \cdot 0,9 = 48,6 \text{ тис. грн.}; \quad Z_{E2} = 400 \cdot 600 \cdot 0,2 \cdot 0,9 = 43,2 \text{ тис. грн.}$$

б) Витрати на амортизацію, поточний ремонт і утримання екструдера:

$$Z_{A1} = (320 + 32) \cdot 0,148 = 52 \text{ тис. грн.}; \quad Z_{A2} = (252 + 25,2) \cdot 0,148 = 41 \text{ тис.}$$

грн.

в) Річні експлуатаційні витрати споживача базового і нового екструдера:

$$I_1 = 48,6 + 52 = 100,6 \text{ тис. грн.}; \quad I_2 = 43,2 + 41 = 84,2 \text{ тис. грн.}$$

Очікуваний річний економічний ефект на один екструдер:

$$E = 32 \cdot 1,11 \cdot + \frac{(100,6 - 84,2) - 0,15 \cdot (32 - 25,2)}{0,25} - 25,2 = 72,0 \text{ тис. грн.}$$

За рахунок використання нової матриці, щільність гранул вище в порівнянні зі стандартними, водостійкість гранул довше на $\sim 10\%$, економія зі 100 кг комбікормових гранул складає ~ 10 кг. При середній вартості комбікорму для риби 48 грн. за 1 кг, річний економічний ефект, використовуючи нові матриці складе 288 тис. грн.

Сумарний річний економічний ефект становитиме:

$$E_{\text{сум}} = E + E_M \quad (6.4)$$

де E_M – річний економічний ефект, за рахунок використання нової матриці, з отворами максимальної пропускної спроможності, тис. грн.

$$E_{\text{сум}} = 72 + 288 = 360 \text{ тис. грн.}$$

ВИСНОВКИ

1. Двошнекові екструдери виявляють численні переваги порівняно з одношнековими моделями, зокрема забезпечують підвищений тиск при видавлюванні комбікормової суміші, рівномірний вихід без пульсацій, а також здатність до обробки матеріалів за один прохід. Дослідження продуктивності таких екструдерів, яке базується на розрахунках об'ємів, що формуються шнеками, дозволяє створити ефективні моделі, які враховують співвідношення між обсягами витків шнеків, перекриттям та робочими параметрами. Використовуючи відповідні формули для розрахунку продуктивності, можна оптимізувати технологічні процеси та покращити якість кінцевої продукції. Визначення раціональних геометричних параметрів отворів матриці екструдера також є критично важливим для досягнення стабільної швидкості потоку та високої якості гранул, що підкреслює необхідність подальшого дослідження та удосконалення технологій екструзії в харчовій промисловості.

2. Класифікація пресуючих пристроїв та технологічні схеми обладнання для пресування демонструють різноманітність конструктивних рішень, що використовуються в комбікормовому виробництві. Зокрема, шнекові гранулятори (тип 3) виявляються найбільш доцільними для виробництва кормів, оскільки вони забезпечують необхідну щільність гранул і високу продуктивність. Двошнекові екструдери, завдяки своїй конструкції, забезпечують ефективне пресування та якість продукції, що робить їх ідеальними для виробництва комбікормів методом вологого гранулювання. Вибір конкретного типу преса залежить від технологічних вимог і фізичних властивостей сировини, що підкреслює важливість оптимізації процесів у виробництві кормів. Обґрунтовано вибір шнекового екструдера в якості базової машини для виробництва гранул комбікормів з щільністю до 1400 г/дм^3 («донні корми») і продуктивністю 100 кг/год для малих і середніх фермерських рибницьких господарств.

3. Розроблено теорію вибору профілю отворів матриці, що забезпечує рівномірний тиск по її довжині і збільшення продуктивності на $\sim 10\%$, в порівнянні з використанням матриці з циліндричним профілем.

4. Розроблено макетний зразок екструдера та проведено експериментальні дослідження процесу його роботи. Визначено раціональні значення параметрів досліджуваного екструдера, а саме: для отримання продуктивності 100 кг/год. (при питомій енергоємності 0,2 кВт·год/кг) діаметр отвору матриці повинен бути 5 мм, діаметр шнеків 60 мм, крок шнека 60 мм, число обертів 140 хв⁻¹, тиск до 1,5 МПа і вологість 33%. Розроблено методику інженерного розрахунку параметрів екструдера з двома шнеками.

5. Забезпечення охорони праці та безпеки в надзвичайних ситуаціях в кормоцеху з виробництва екструдованих кормів є критично важливим аспектом для забезпечення здоров'я працівників та ефективності виробництва. Систематичний підхід до оцінки небезпечних факторів та впровадження заходів безпеки не лише захищає здоров'я працівників, але й підвищує ефективність виробничих процесів. Впровадження належних заходів охорони праці та підготовка до надзвичайних ситуацій є важливими кроками до створення безпечного робочого середовища.

6. Розробка двошнекового екструдера для малих фермерських господарств, що займаються розведенням риби, демонструє значний економічний потенціал. З урахуванням річної потреби в комбікормах до 60 тонн, річний економічний ефект від впровадження нового екструдера складає 360 тис. грн. Це включає 72 тис. грн. економії на експлуатаційних витратах і 288 тис. грн. завдяки підвищенню щільності гранул та покращеній водостійкості, що становить близько 10% порівняно зі стандартними екструдерами. Таким чином, даний екструдер забезпечить не лише підвищення ефективності виробництва, але й значну економію витрат, підтверджуючи його перспективність для фермерських господарств замкнутого циклу.

Бібліографія

1. Алієв, Е. Б. (2023). *Чисельне моделювання процесів агропромислового виробництва: підручник*, 340 с. Київ: Аграрна наука. <https://doi.org/10.31073/978-966-540-584-9>
2. Борщевський, П. П., & Стасишен, М. С. (2010). Рибний ринок України: проблеми і перспективи розвитку. *Економіка України*, (3), 51-57.
3. Горай, Н. О. (2004). Ефективність вирощування риби за трилітнього циклу у малих водоймах. *Рибне господарство: тематичний науковий збірник*, (63), 45-48.
4. Горай, Н. О. (2003). Фермерське рибне господарство України. *Таврійський науковий вісник*, (29), 51-55.
5. Горай, Н. О., & Рекрут, С. В. (2005). Використання експрес-методу контролю росту риб для фермерських господарств. У *Проблеми становлення галузі тваринництва в сучасних умовах: Матеріали наук.-практ. конференції*, 167-170 с. Вінниця.
6. Гринжевський, М. В., & Горай, Н. О. (2003). Потенційні можливості фермерського рибного господарства. У *Рибне господарство України: стан і перспективи*, 260-265 с. Київ: Вища освіта.
7. Гринжевський, М. В., Третяк, О. М., Горай, Н. О., & Стрілецький, О. І. (2004). Перспективи розвитку фермерських рибних господарств в Україні. У *Проблеми і перспективи розвитку аквакультури в Україні: Матеріали наук.-практ. конференції, присвяченої 40-річчю об'єднання "Укррибгосп"*, 42-51 с. Київ.
8. Закон України «Про рибне господарство, промислове рибальство та охорону водних біоресурсів» від 18.09.2012. № 3667-17. Режим доступу: <http://rada.gov.ua>
9. Закон України «Про рибу, інші водні живі ресурси та харчову продукцію з них» від 06.02.2003. №486-IV зі змінами та доповненнями від 05.09.2013. Режим доступу: <http://rada.gov.ua>

10. Лянзберг, О. В. (2008). Амінокислотний склад білків м'язової тканини цьоголітків корошових риб. У *Матеріали науково-практичної конференції молодих вчених «Наукове забезпечення раціонального використання природно-ресурсного потенціалу територій та акваторій України»*, 15-19 с. Херсон.
11. Лянзберг, О. В. (2008). Аналіз живлення молоді корошових риб в умовах полікультури. У *Тези I міжнародної іхтіологічної науково-практичної конференції «Сучасні проблеми теоретичної і практичної іхтіології»*, 102-104 с. Канів.
12. Лянзберг, О. В. (2008). Використання нехарчової риби з метою одержання додаткової рибопродукції. У *Матеріали Міжнародної науково-педагогічної конференції «Современное состояние рыбного хозяйства: проблемы и пути решения»*, 88-91 с. Херсон.
13. Лянзберг, О. В. (2008). Вплив екологічних умов вирощування на біохімічні показники цьоголітків корошових риб. У *Збірник тез IV Міжнародної наукової конференції студентів і аспірантів «Молодь та поступ біології»*, 434-435 с. Львів.
14. Лянзберг, О. В. (2008). Вплив зимівлі на гематологічні показники корошових риб. У *Тези доповідей молодих учених: Матеріали III Міжнародної конференції «Біологія: від молекули до біосфери»*, 382-384 с. Харків.
15. Лянзберг, О. В. (2008). Вплив термічного режиму на результативність зимівлі рибопосадкового матеріалу корошових риб в умовах півдня України. *Таврійський науковий вісник*, (56), 172-176.
16. Лянзберг, О. В. (2007). Вплив термічного режиму у процесі зимівлі на морфо-біологічні показники річняків корошових риб. У *Тези доповідей молодих учених: Матеріали II Міжнародної конференції «Біологія: від молекули до біосфери»*, 271-272 с. Харків.
17. Лянзберг, О. В. (2008). Вплив щільності посадки на рибогосподарсько-біологічні та біохімічні показники цьоголітків корошових риб в умовах півдня України. *Таврійський науковий вісник*, (60), 158-164.

18. Лянзберг, О. В., & Шерман, І. М. (2008). Динаміка гематологічних показників корошових риб протягом зимового утримання. *Рибогосподарська наука України*, (4), 104-107.
19. Онученко, О. В., Кулешов, О. В., Третяк, О. М., & Ганкевич, Б. О. (2001). Результати експериментальних робіт з відтворення та вирощування веслоноса в Україні. *Рибне господарство*, (59-60), 17-22.
20. Онученко, О. В., & Третяк, О. М. (2001). Перший досвід штучного відтворення веслоноса в Україні. *Наукові записки, серія: біологія*, (4), 177-178.
21. Онученко, О. В., Третяк, О. М., & Кулешов, О. В. (2003). *Основи рибогосподарського освоєння веслоноса *Polyodon spathula* (Walbaum)*, 111 с. Київ: Вища освіта.
22. Алієв, Е. Б., Миколенко, С. Ю., Сова, Н. А., та ін. (2022). Техніко-технологічне забезпечення безвідходної переробки зернової сировини у харчові продукти і корми: колективна монографія (за заг. ред. Е. Б. Алієва). Дніпро: ЛПРА. ISBN 978-966-981-687-0.
23. Aliiev, E., Maliehin, R., Ivliev, V., & Aliieva, O. (2021). Simulation of the process of cavitation treatment of liquid feed [Техніко-технологічне забезпечення комплексної безвідходної переробки рослинної сировини олійних культур у корми для органічного тваринництва]. *Scientific Horizons*, 24(2), 16-26. [https://doi.org/10.48077/scihor.24\(2\).2021.16-26](https://doi.org/10.48077/scihor.24(2).2021.16-26)
24. Шевченко, І. А., Алієв, Е. Б., & Доруда, С. О. (2013). Моделювання процесу потокового змішування кормосумішей з використанням методу дискретних елементів. *Механізація та електрифікація сільського господарства*, (97), 536-544.
25. Доруда, С. А., & Алієв, Е. Б. (2013). Усовершенствование конструктивно-технологической схемы смесителя-кормораздатчика потокового типа. У Материалы Международной научно-практической конференции (с. 260-263). Минск: БГАТУ.
26. Шевченко, І. А., Алієв, Е. Б., & Доруда, С. О. (2013). Результати моделювання процесу потокового змішування кормосумішей змішувачем-

кормороздавачем. Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин, (43, частина 1), 202-207.

27. Січкарь, А. В., Алієв, Е. Б., & Лиходід, В. В. (2015). Стан і перспективи розвитку вівчарства та козівництва в Запорізькій області. У Інтенсифікація кормовиробництва – основа сталого розвитку галузі тваринництва (с. 71-74). Полтава.

28. Доруда, С. О., & Алієв, Е. Б. (2015). До оцінки якості роботи змішувача-кормороздавача потокового типу. У Інтенсифікація кормовиробництва – основа сталого розвитку галузі тваринництва (с. 75-77). Полтава.

29. Алієв, Е. Б., Луц, П. М., & Верета, В. В. (2019). Обґрунтування конструктивно-технологічної схеми роторно-кавітаційного диспергатора кормосумішей. У Сучасні проблеми та технології аграрного сектору України (с. 17-25). Ніжин.

30. Алієв, Е. Б., & Малегін, Р. Д. (2020). Ефективність впровадження технології годівлі тварин кормами після кавітаційної обробки. У Матеріали XVI міжнародної науково-практичної конференції «Найновите научни постижения – 2020» (с. 39-41). Софія: Бял ГРАД-БГ ОДД.

31. Алієв, Е. Б., Миколенко, С. Ю., Яропуд, В. М., & Малегін, Р. Д. (2020). Обґрунтування конструктивно-технологічної схеми кавітаційного диспергатора-гомогенізатора сільськогосподарської сировини рослинного походження на кормові цілі. Техніка, енергетика, транспорт АПК, 2(109), 5-15. <https://doi.org/10.37128/2520-6168-2020-2-1>

32. Алієв, Е. Б., & Малегін, Р. Д. (2020). Обґрунтування доцільності використання диспергаторів рідких кормів. У Матеріали XXI Міжнародної наукової конференції «Сучасні проблеми землеробської механіки» (с. 7). Харків: ХНТУСГ.

33. Алієв, Е. Б., Дудін, В. Ю., Алієва, О. Ю., & Малегін, Р. Д. (2020). Результати чисельного моделювання кавітаційного диспергатора рідких кормів.

Технічний сервіс агропромислового, лісового та транспортного комплексів, 21, 33-40. <https://doi.org/10.37700/ts.2020.21.33-40>

34. Алієв, Е. Б., & Лінко, М. О. (2022). Аналіз техніко-технологічного оснащення процесів експандованого приготування кормів. *Техніка, енергетика, транспорт АПК*, 1(116), 51-57.

35. Алієв, Е. Б., & Лінко, М. О. (2022). Методика чисельного моделювання процесу експандованого приготування кормів. У *Наукові аспекти формування сучасних агротехнологій* (с. 160-161). Херсон: ІЗЗ НААН.

36. Алієв, Е. Б., & Лінко, М. О. (2022). Аналіз техніко-технологічного оснащення процесів експандованого приготування кормів. *Корми і факти*, 9(145), 8-10.

37. Алієв, Е. Б., Лінко, М. О., & Алієва, О. Ю. (2022). Симуляція процесу експандованого приготування кормів. *Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки*, 5(36), ч. II, 176-185. [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2022.5\(36\).2.176-185](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2022.5(36).2.176-185)

38. Алієв, Е. Б., & Лінко, М. О. (2022). Експандоване приготування кормів. У *Матеріали Всеукраїнської науково-практичної конференції «Досягнення та перспективи галузі виробництва, переробки і зберігання сільськогосподарської продукції»* (с. 38-40). Кропивницький: ЦНТУ.

39. Алієв, Е., Малегін, Р., & Алієва, О. (2022). Етапи розробки гомогенізатора-диспергатора рідких кормів. У *Матеріали Всеукраїнської науково-практичної конференції «Досягнення та перспективи галузі виробництва, переробки і зберігання сільськогосподарської продукції»* (с. 40-41). Кропивницький: ЦНТУ.

40. Алієв, Е. Б., Кошулько, В. С., & Кочережко, Н. В. (2023). Обґрунтування конструктивно-технологічних параметрів роторного змішувача комбікормів періодичної дії. *Техніка, енергетика, транспорт АПК*, 3(122), 5–13. <https://doi.org/10.37128/2520-6168-2023-3-1>

41. Алієв, Е. Б., & Лінко, М. О. (2023). Обґрунтування конструктивних параметрів формуючої насадки експандера кормів. *Механіка та автоматика*

агропромислового виробництва, 2(216), 143–152. <https://doi.org/10.37204/2786-7765-2023-2-15>

42. Алієв, Е. Б., & Лінко, М. О. (2023). Експериментальні дослідження експандера кормів. У Збірник тез доповідей XXIV Міжнародної наукової конференції «Сучасні проблеми землеробської механіки» (с. 229–232). Національний університет біоресурсів і природокористування України.

43. Алієв, Е. Б., Дудін, В. Ю., & Лінко, М. О. (2023). Результати експериментальних досліджень малогабаритного експандера кормів. Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин, 53, 121–130. <https://doi.org/0.32515/2414-3820>

44. Алієв, Е. Б., & Лінко, М. О. (2023). Обґрунтування конструкційних параметрів формувальної насадки експандера кормів. Загальнодержавний збірник «Механіка та автоматика агропромислового виробництва», 2(116), 143–152. <https://doi.org/10.37204/2786-7765-2023-2-15>

45. Алієв, Е. Б., & Лінко, М. О. (2023). Результати чисельного моделювання формуючої насадки експандера кормів. У Міжнародної науково-практичної конференції «Використання сучасних технологій та техніки в аграрному виробництві» (с. 17–22). ВП НУБіП України «Ніжинський агротехнічний інститут».

Дніпровський державний аграрно-економічний університет
Інженерно-технологічний факультет
Кафедра інжинірингу технічних систем

**Обґрунтування конструктивно-режимних параметрів гвинтового
екструдера комбікормів для об'єктів аквакультури**

Додатки

Виконав: магістрант групи МГАІз-1-23
Костромітішов Лев Вячеславович

Керівник: доктор філософії
Лушко Кристина Олегівна

Дніпро, 2024

Мета роботи полягає в дослідженні технологічного процесу і визначенні раціональних параметрів пнекового екструдера для виробництва комбікормів.

Завданнями дослідження є:

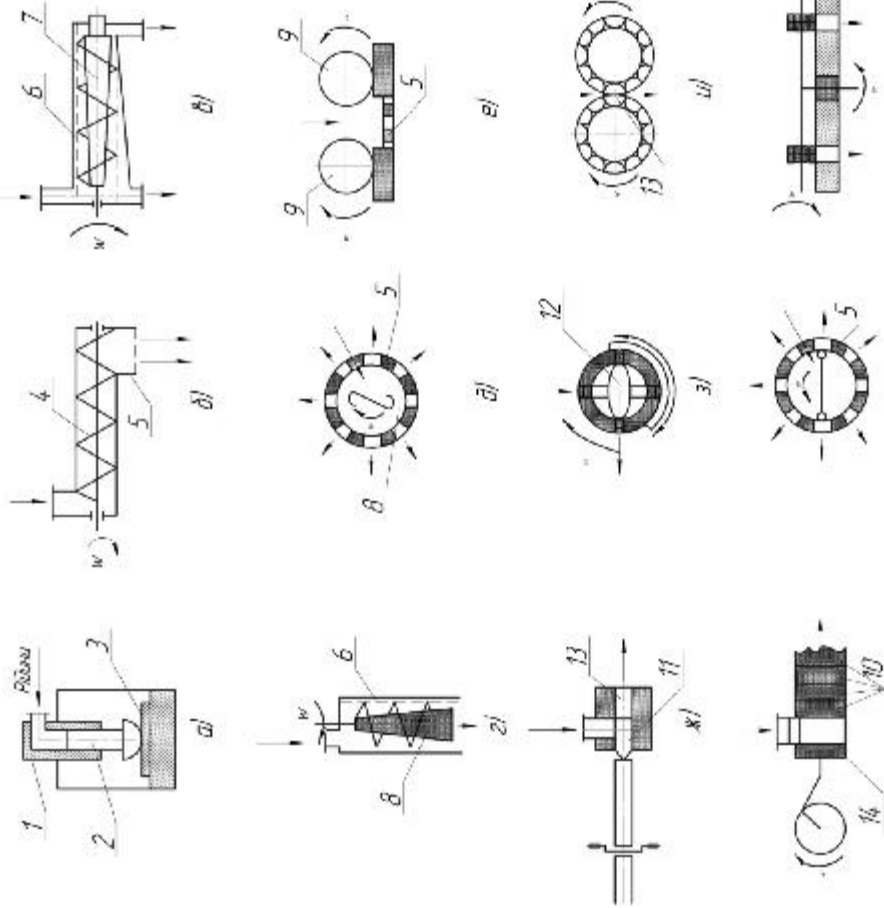
- проаналізувати стан питання процесу виробництва комбікормів для об'єктів аквакультури;
- розробити методику визначення форми отворів матриці по її довжині для забезпечення рівномірної продуктивності;
- розробити макетний зразок екструдера;
- експериментально визначити раціональні параметри екструдера;
- розробити методику інженерного розрахунку екструдера з двома шнеками;
- виконати розрахунок річного економічного ефекту для запропонованої конструкції екструдера.

Об'єкт дослідження: процес екструзії комбікормів для рибицтва.

Предмет дослідження: пнековий екструдер.

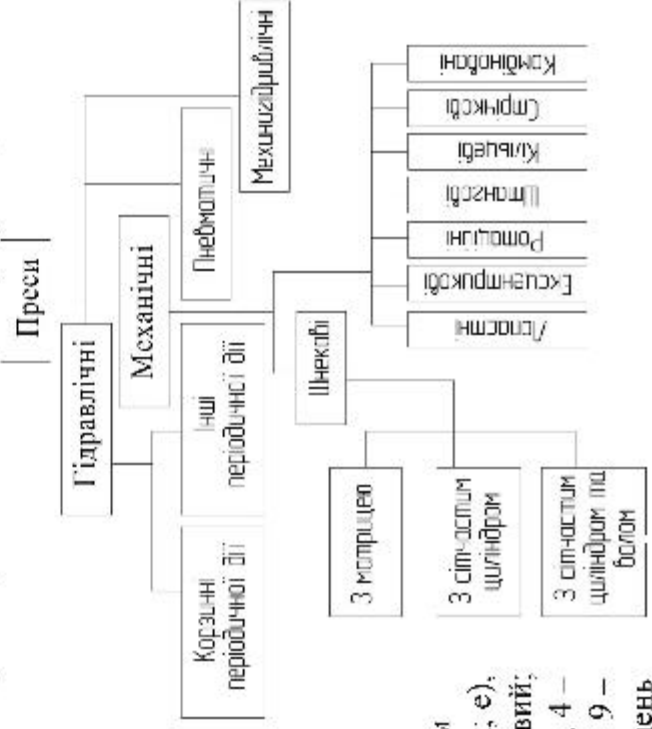
У відповідності зі специфікою годування риби комбікорми для них поділяють на три види, а саме:

- «дошній» (потопаючий і довго зберігас свою структуру на дні, питома вага 1000-1400 г/дм³): риби забирають корм з дна водою, папристлад корол, а також креветки та інші ракоподібні (поїдають корм тільки з дна);
- «потопаючий»: (повільно опускається корм): призначений холодноводної і хижкої риби;
- «плаваючий» (з поверхні води, питома вага 900-1000 г/дм³): корм для тепловодних риби, так як вони їдять в 6 разів повільніше, ніж хижі риби, їм потрібно стабільність корму в воді.



Технологічні схеми обладнання для пресування

а) гідравлічний; б) шнековий з матрицею; в) шнековий з сітчастим циліндром; г) шнековий з сітчастим циліндром і валом; д) лопатевий; е), л), м) валкові (роликів); ж) ексцентриканий; з) ротаційний; і) кільцевий; к) штемпельний; 1 – гідроциліндр; 2 – шунжер; 3 – пресуюча плита; 4 – шнек; 5 – матриця; 6 – сітчастий циліндр; 7 – вал; 8 – сітчастий вал; 9 – валик; 10 – брикет; 11 – пуансон; 12 – ротор; 13 – гранула; 14 – поршень



ПРОДУКТИВНІСТЬ ДВОШНЕКОВОГО ЕКСТРУДЕРА

$$Q = \left(2\pi \cdot r^2 \cdot t - \varepsilon \cdot \left(r^2 \cdot \left(\frac{\pi}{2} - 2\theta \right) - 2f \cdot a \right) \right) \cdot m \cdot n,$$

де r – радіус шнека, м;

θ – кут підйому витка, град;

$$\theta = \arccos \frac{a}{r}; f = \frac{F}{2},$$

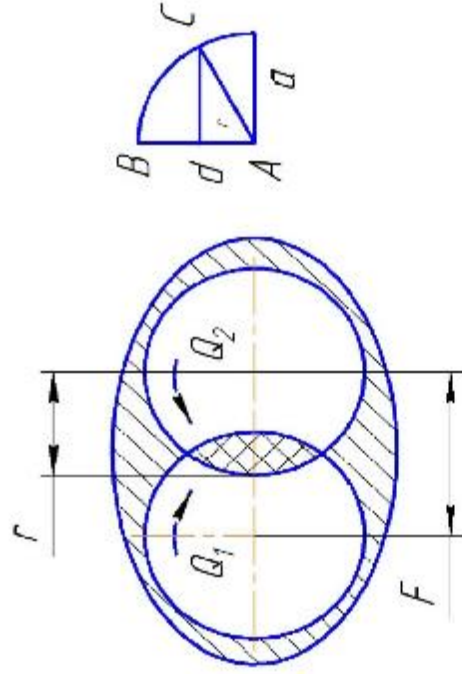
F – відстань між центрами окружності, м;

t – крок між витками шнека, м;

ε – товщина витка шнеку, м;

m – число заходів шнека;

n – частота обертання шнека, s^{-1} .



ВИЗНАЧЕННЯ РАЦІОНАЛЬНОГО ВХІДНОГО РАДІУСА ОТВОРУ

$$R = \sqrt[4]{\frac{r^8 \cdot 496 \cdot \eta^4 \cdot \beta \cdot r^4 \cdot g}{\Delta p^2 \cdot \pi^2}},$$

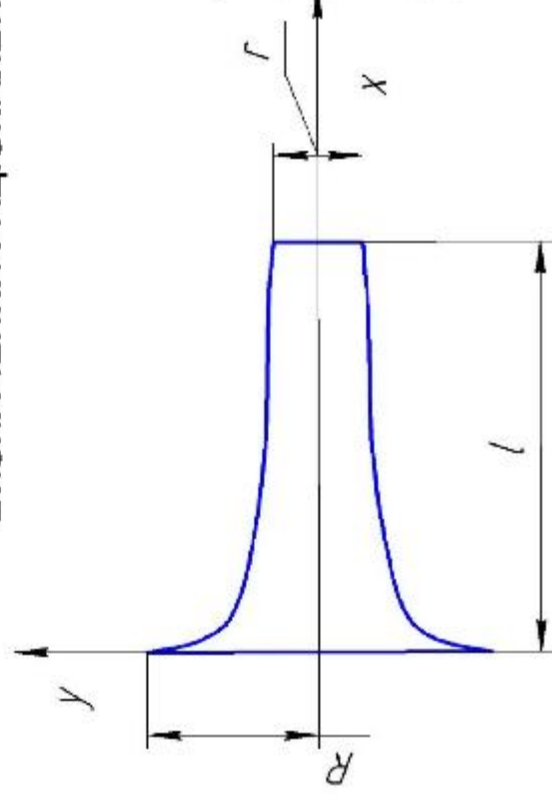
η – в'язкість комбікорму, Па·с;

r – радіус гранули;

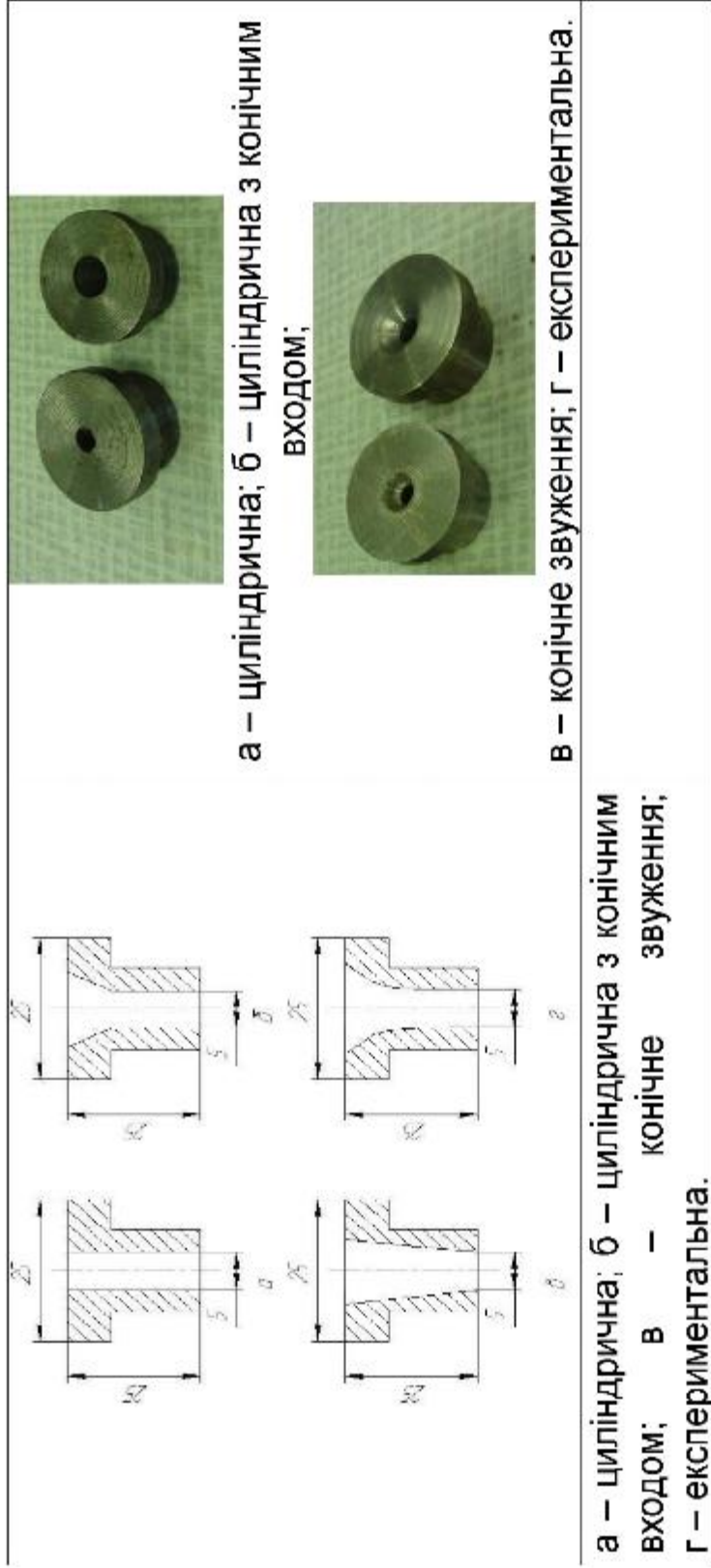
Δp – різниця тисків на вході і на виході з отвору, Па;

l – довжина отвору, м.

g – прискорення сили тяжіння, m/s^2 ;

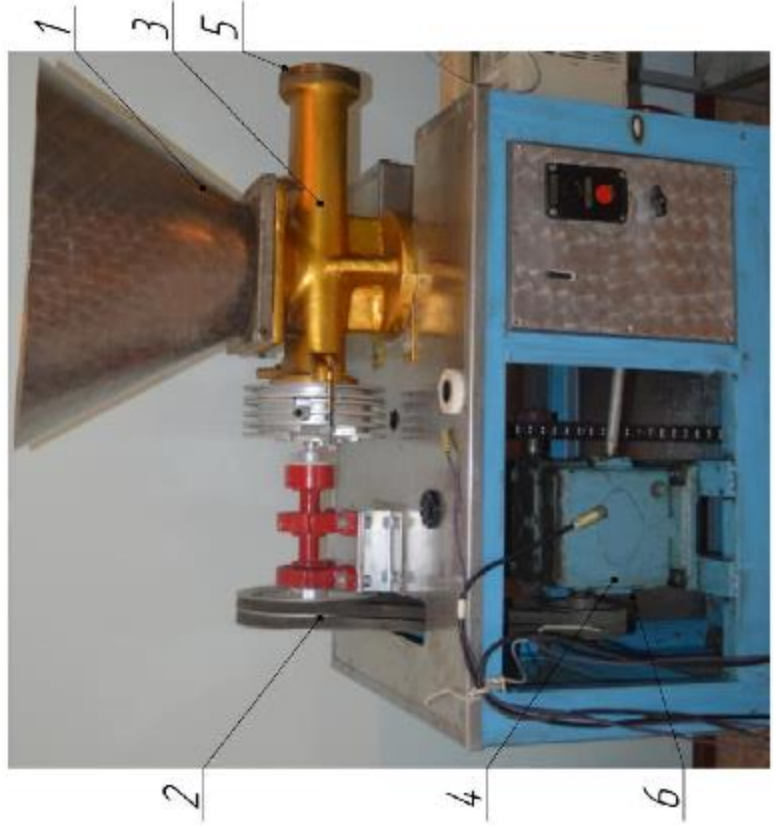
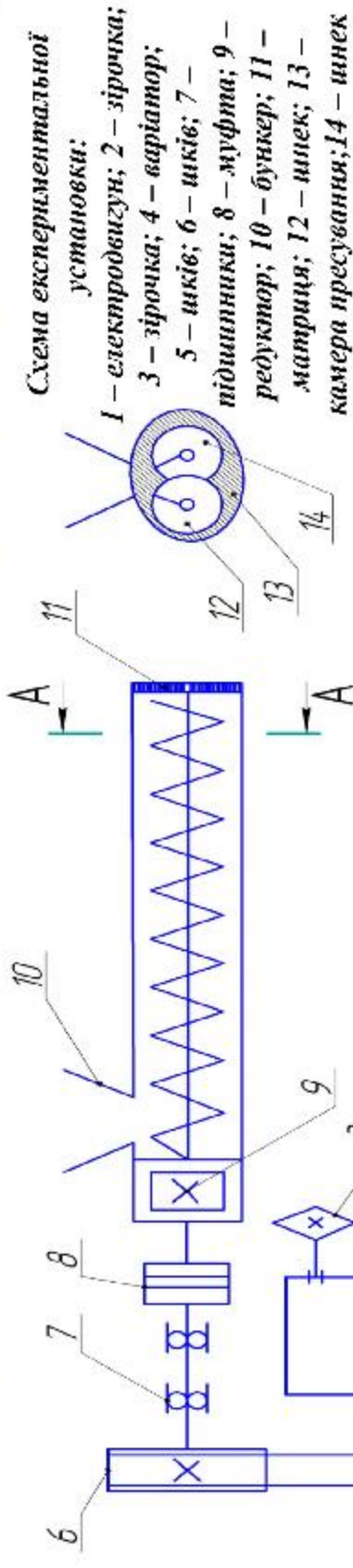


ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ГРАНУЛЮВАННЯ ЧЕРЕЗ ОТВОРИ РІЗНОЇ ФОРМИ



Результати експерименту ($V=700 \text{ cm}^3$)

Вид отвору	Тиск, МПа	Час закінчення, с
Циліндричне	$5,18 \pm 0,1$	60
Циліндр з конічним входом	$5,14 \pm 0,1$	50
Конічне	$5,1 \pm 0,1$	45
Експериментальне	$5,01 \pm 0,1$	40

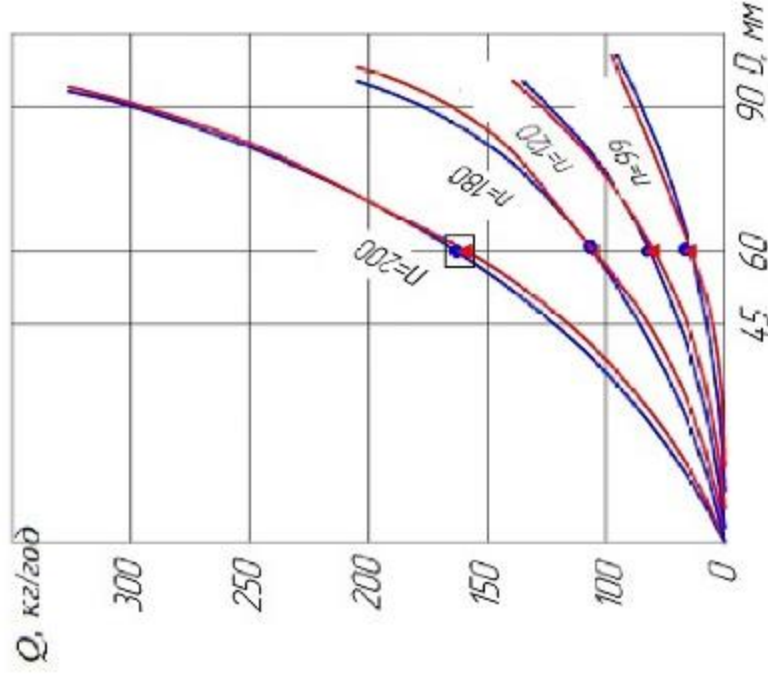


Загальний вигляд

експериментальної установки:

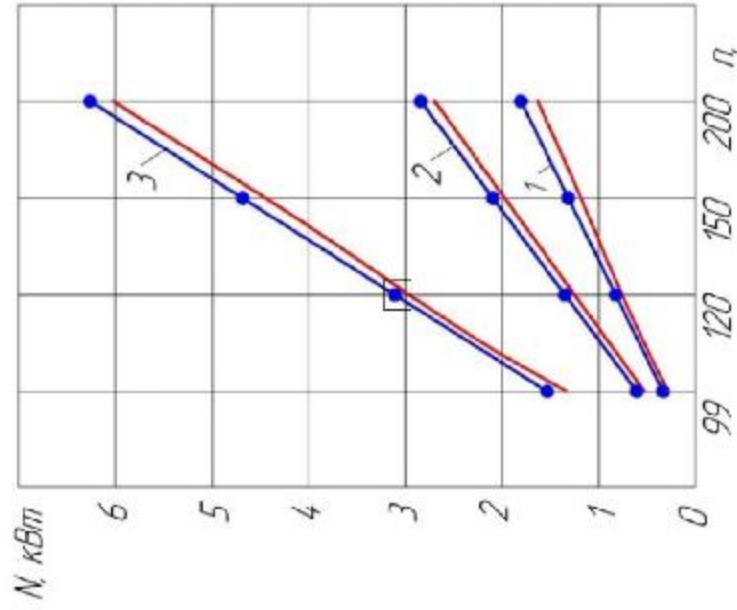
- 1 – завантажувальний бункер;
- 2 – диск; 3 – пресувальна частина; 4 – варіатор; 5 – головка зі змінними матрицями;
- 6 – тиристорний регулятор

ВИЗНАЧЕННЯ ПРОДУКТИВНОСТІ ТА ЕНЕРГОЄМНОСТІ ПРОЦЕСУ



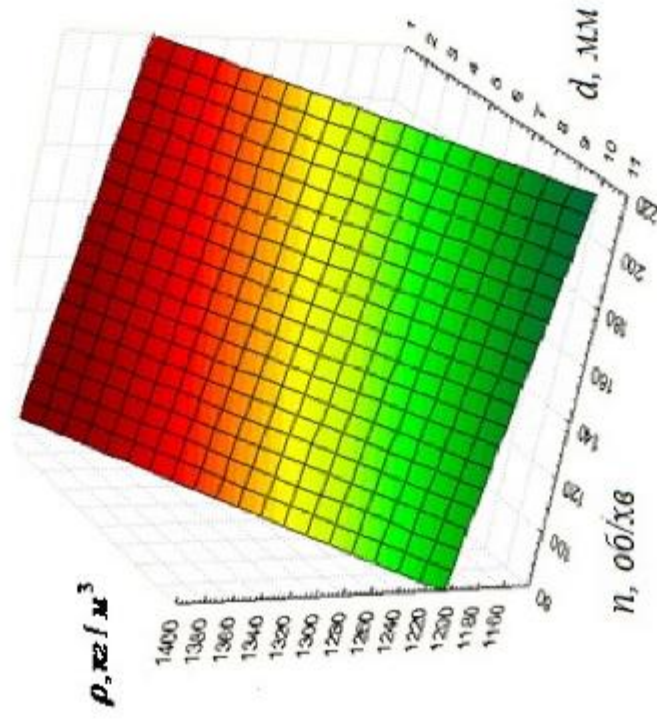
Залежність продуктивності шнекового екструдера від діаметра шнека з експериментальними і розрахунковими даними, отримані методами моделювання при різних швидкостях обертання шнеків.

● - експериментальні значення; — - теоретичні значення.

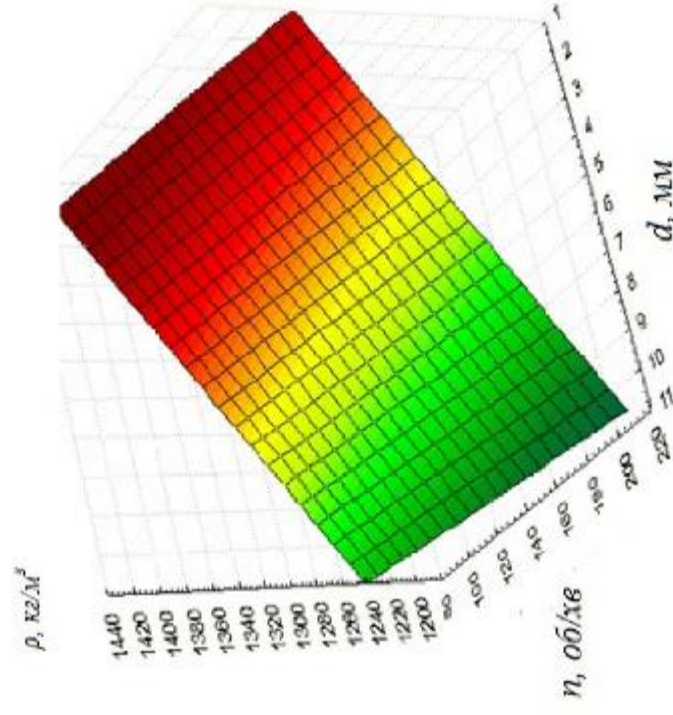


● - експериментальні значення; — - теоретичні значення.

Залежність споживаної потужності шнекового екструдера від числа обертів шнека: шнек діаметром 45 мм (крива 1), 60 мм (крива 2) і 90 мм (крива 3) за дослідченим і розрахунковими даними, отриманими методом моделювання від швидкості шнеків.



Залежність зміни щільності гранул від діаметра отворів стандартної матриці і числа обертів шнеків ($W = 33\%$)



Залежність зміни щільності гранул від діаметра отворів експериментальної матриці і числа обертів шнеків ($W = 33\%$).

№	Найменування показника	Одиниці вимірювання	Базовий екструдер	Новий екструдер
1	Продуктивність	кг/год	90	100
2	Питома витрата енергії	кВт·год/кг	0,25	0,2
3	Річний режим роботи	год	600	600
4	Вартість однієї кВт·год енергії	грн	3,6	3,6
5	Вартість екструдера	тис. грн	320	252
6	Витрати на монтаж устаткування (10% від вартості)	тис. грн	32	25,2
7	Норма відрахувань на капітальний і поточний ремонт	%	14,8	14,8
8	Річний об'єм виробництва комбікормів	кг	216 000	240 000
9	Витрати на електроенергію	тис. грн	48,6	43,2
10	Витрати на амортизацію, поточний ремонт і утримання	тис. грн	52	41
11	Річні експлуатаційні витрати	тис. грн	100,6	84,2
12	Економія на експлуатаційних витратах	тис. грн	-	16,4
13	Економія на використанні нової матриці	тис. грн	-	288
14	Сумарний річний економічний ефект	тис. грн	-	360

1. Двошпелеві екструдери виявляють численні переваги порівняно з одношпелевими моделями, зокрема забезпечують підвищений тиск при видавлюванні комбікормової суміші, рівномірний вихід без пульсації, а також здатність до обробки матеріалів за один прохід. Дослідження продуктивності таких екструдерів, яке базується на розрахунках об'ємів, що формуються шнеками, дозволяє створити ефективні моделі, які враховують співвідношення між об'ємами витків шнеків, перекриттям та робочими параметрами. Використовуючи відомі/ні формули для розрахунку продуктивності, можна оптимізувати технологічні процеси та покращити якість кінцевої продукції. Визначення раціональних геометричних параметрів отворів матриці екструдера також є критично важливим для досягнення стабільної швидкості потоку та високої якості гранул, що підкреслює необхідність подальшого дослідження та удосконалення технології екструзії в харчовій промисловості.
2. Класифікація пресуючих пристроїв та технологічні схеми обладнання для пресування демонструють різноманітність конструктивних рішень, що використовуються в комбікормовому виробництві. Зокрема, шнекові гранулятори (тип 3) виявляються найбільш доцільними для виробництва кормів, оскільки вони забезпечують необхідну щільність гранул і високу продуктивність. Двошпелеві екструдери, завдяки своїй конструкції, забезпечують ефективне пресування та якість продукції, що робить їх ідеальними для виробництва комбікормів методом вологого гранулювання. Вибір конкретного типу преса залежить від технологічних вимог і фізичних властивостей сировини, що підкреслює важливість оптимізації процесів у виробництві кормів. Обрунтовано вибір шнекового екструдера в якості базової машини для виробництва гранул комбікормів з щільністю до 1400 г/дм³ («донні корми») і продуктивністю 100 кг/год для малих і середніх фермерських господарств.
3. Розроблено теорію вибору профілю отворів матриці, що забезпечує рівномірний тиск по її довжині і збільшення продуктивності на ~10%, в порівнянні з виокремленим профілем.
4. Розроблено макетний зразок екструдера та проведено експериментальні дослідження процесу його роботи. Визначено раціональні значення параметрів досліджуваного екструдера, а саме: для отримання продуктивності 100 кг/год (при питомій енергоспоживності 0,2 кВт/год/кг) діаметр отвору матриці повинен бути 5 мм, діаметр шнеків 60 мм, крок шнека 60 мм, число обертів 140 хв⁻¹, тиск до 1,5 МПа і вологість 33%. Розроблено методичку інженерного розрахунку параметрів екструдера з двома шнеками.
5. Розробка двошпелевого екструдера для малих фермерських господарств, що займаються розведенням риби, демонструє значний економічний потенціал. З урахуванням річної потреби в комбікормах до 60 тонн, річний економічний ефект від впровадження нового екструдера складає 360 тис. грн. Це включає 72 тис. грн. економії на експлуатаційних витратах і 288 тис. грн. завдяки підвищенню щільності гранул та покращеній водостійкості, що становить близько 10% порівняно зі стандартними екструдерами. Таким чином, даний екструдер забезпечить не лише підвищення ефективності виробництва, але й значну економію витрат, підтверджуючи його перспективність для фермерських господарств замкнутого циклу.