

ДНІПРОВСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ АГРАРНО-ЕКОНОМІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Інженерно-технологічний факультет

Кафедра інжинірингу технічних систем

Пояснювальна записка

до дипломної роботи
рівня вищої освіти «Магістр» на тему:

**Обґрунтування робочих параметрів преса-гранулятора
органічних добрив**

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

_____ Дешеви́ло Олександр Сергі́йович

Керівник: _____ Івлєв Віталій Володимирович

Рецензент: _____ Садченко Роман Вікторович

Дніпро 2024

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

Кафедра інжинірингу технічних систем
Рівень вищої освіти: «Магістр»
Спеціальність: 208 «Агроінженерія»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

ІТС

(назва кафедри)

доцент

(вчене звання)

Дудін В.Ю.

(підпис)

(прізвище, ініціали)

«12» листопада 2024 р.

**ЗАВДАННЯ
НА ДИПЛОМНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ**

Дешевилу Олександр Сергійовичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи: Обґрунтування робочих параметрів преса-гранулятора органічних добрив

керівник роботи: к.т.н., доцент Івлєв Віталій Володимирович

(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 р.

3. Вихідні дані до роботи Аналіз стану питання процесів та обладнання для обробки та переробки твердої фракції рідкого гною. Патентний пошук, аналіз літературних джерел, останніх досліджень з обраної тематики.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) 1. Аналіз стану питання. 2. Теоретичні дослідження процесу вологого гранулюванні шнековим пресом. 3. Лабораторні дослідження макетного зразка шнекового гранулятора. 4. Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях. 5. Техніко-економічна оцінка розробленого гранулятора. Загальні висновки. Бібліографічний список

5. Перелік демонстраційного матеріалу

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

6. Консультанти розділів роботи

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

7. Дата видачі завдання: 12.11.2024 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Аналітичний (оглядовий)	до 01.10.2024 р.	
2	Теоретичний	до 20.10.2024 р.	
3	Експериментальний	до 09.11.2024р.	
4	Охорона праці	до 19.11.2024 р.	
5	Економічний	до 26.11.2024 р.	
6	Демонстраційна частина	до 30.11.2024р.	

Студент

(підпис)

Дешевило О.С.

(прізвище та ініціали)

Керівник роботи

(підпис)

Івлєв В.В.

(прізвище та ініціали)

[illegible]

Дешевило О.С. Обґрунтування робочих параметрів преса-гранулятора органічних добрив /Випускна кваліфікаційна робота на здобуття освітнього ступеня «магістр» за спеціальністю 208 «Агроінженерія» – ДДАЕУ, Дніпро, 2024.

Вступна частина дипломної роботи містить обґрунтування актуальності обраної теми, чітко визначені мету та задачі дослідження, а також описані методи, використані у роботі. Проведений аналіз стану питання дозволив окреслити шляхи досягнення поставлених цілей. У другому розділі виконано теоретичне моделювання процесу роботи гранулятора твердої фракції гною. Результати лабораторних досліджень підтвердили високу якість функціонування запропонованої конструкції. Додатково було оцінено розробку з точки зору відповідності вимогам охорони праці. Завершальним етапом стало економічне обґрунтування ефективності проекту. У висновках підсумовано основні результати роботи, а також складено перелік використаних джерел.

Ключові слова: твердий гній, гранулювання, добрива, гранула, фільєра

ЗМІСТ

Вступ	8
1 АНАЛІЗ СТАНУ ПИТАННЯ	10
1.1 Технології обробки рідкого гною свиней	10
1.2 Розробка ресурсозберігаючої технології переробки твердої фракції гною свиней на гранули	13
1.3 Аналіз обладнання для гранулювання	16
1.4 Шляхи підвищення ефективності вологого гранулювання	19
1.5 Висновки по розділу	21
2 ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ГРАНУЛЮВАННЯ ШНЕКОВИМ ПРЕСОМ	23
2.1 Обґрунтування схеми гранулятора органічних добрив	23
2.2 Теоретичні дослідження руху твердої фракції зброженого гною	27
2.3 Визначення об'ємної витрати через фільтр	35
2.4 Визначення продуктивності шнекового гранулятора	41
2.5 Визначення потужності шнекового гранулятора	44
2.6 Висновки по розділу	47
3 ЛАБОРАТОРНІ ДОСЛІДЖЕННЯ МАКЕТНОГО ЗРАЗКА ШНЕКОВОГО ГРАНУЛЯТОРА	49
3.1 Програма лабораторних досліджень	49
3.2 Методика лабораторних досліджень	50
3.3 Результати лабораторних досліджень	54
3.4 Висновки по розділу	58
4 ОХОРОНА ПРАЦІ	60
4.1 Загальні вимоги охорони праці при роботі з системами обробки та переробки гною	60
4.2 Проект інструкції з охорони праці при роботі з гранулятором гною	62
4.3 Порядок дій у надзвичайних ситуаціях	64

4.4 Висновки по розділу	64
5 ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНА ОЦІНКА РОЗРОБЛЕНОГО ГРАНУЛЯТОРА	66
5.1 Вихідні дані	66
5.2 Розрахунок показників економічної ефективності	67
5.3 Висновки по розділу	68
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	69
БІБЛІОГРАФІЯ	70
ДОДАТКИ	73

ВСТУП

Розвиток сучасного сільського господарства невід'ємно пов'язаний із пошуком ефективних, екологічно безпечних і ресурсозберігаючих технологій, які б забезпечували підвищення продуктивності сільськогосподарських культур та збереження природного середовища. Одним із ключових аспектів є підвищення родючості ґрунтів, що вимагає використання якісних добрив. На фоні глобальних екологічних викликів і зростаючого попиту на екологічно чисту продукцію органічні добрива стають перспективною альтернативою традиційним хімічним засобам. Вони не тільки збагачують ґрунт необхідними елементами живлення, а й сприяють відновленню його природної структури, поліпшенню водопроникності, а також активізації біологічних процесів.

Однак використання органічних добрив вимагає вирішення ряду технічних та технологічних завдань. Однією з ключових проблем є необхідність удосконалення технологій їх переробки, які забезпечували б зручність використання, транспортування, тривале зберігання та рівномірне внесення у ґрунт. У цьому контексті важливим напрямом є гранулювання органічних добрив, яке дозволяє формувати продукт із заданими фізико-механічними властивостями. Цей процес потребує застосування спеціалізованого обладнання – пресів-грануляторів, від ефективності роботи яких залежить якість кінцевої продукції та загальна продуктивність технологічної лінії.

Преса-гранулятори виконують ключову роль у процесі перетворення органічних матеріалів у гранульовану форму. Від їх конструктивних характеристик, правильного налаштування робочих параметрів та оптимального режиму роботи залежить не лише якість гранул, але й енергетична ефективність, надійність роботи обладнання та економічна доцільність виробництва. Удосконалення цих параметрів сприяє зниженню витрат сировини та енергії, а також розширенню можливостей застосування органічних добрив у промислових масштабах.

Актуальність дослідження обумовлена необхідністю розробки і впровадження більш продуктивних і енергоефективних рішень для гранулювання органічних добрив. Сьогодні існує значний попит на нові технології, які б дозволили досягти високої якості продукту, забезпечуючи екологічну безпеку та економічну вигоду виробництва.

Метою даної роботи є дослідження та обґрунтування оптимальних робочих параметрів преса-гранулятора для виготовлення органічних добрив. Реалізація цієї мети передбачає аналіз сучасних конструкцій обладнання, визначення впливу технологічних факторів на якість гранул та розробку рекомендацій щодо вдосконалення конструкції й режимів роботи преса-гранулятора. Результати дослідження сприятимуть розвитку галузі органічного землеробства, підвищенню ефективності аграрного виробництва та зменшенню антропогенного впливу на довкілля.

Об'єкт дослідження – процес вологого гранулювання твердої фракції рідкого свинячого гною в шнековому грануляторі.

Предмет дослідження – закономірності перебігу технологічного процесу вологого гранулювання твердої фракції рідкого свинячого гною у шнековому грануляторі.

Методи досліджень. У теоретичних дослідженнях використані основи реології дисперсних систем, а також положення і методи класичної гідравліки, математики та теорії подібності. Лабораторні методи дослідження реалізовані на фізичних моделях і дослідному стенді шнекового гранулятора. Отримані дані оброблялися методами математичної статистики з використанням пакетів прикладних програм «Statistica 7.0» та «Microsoft Office Excel 2016».

1 АНАЛІЗ СТАНУ ПИТАННЯ

1.1 Технології обробки рідкого гною свиней

Провівши аналіз наявних в Україні технологічних рішень з обробки та переробки гною, нами було виявлено, що найбільшого застосування знаходять прості та дешеві їх варіанти, хоча вони не завжди екологічно безпечні.

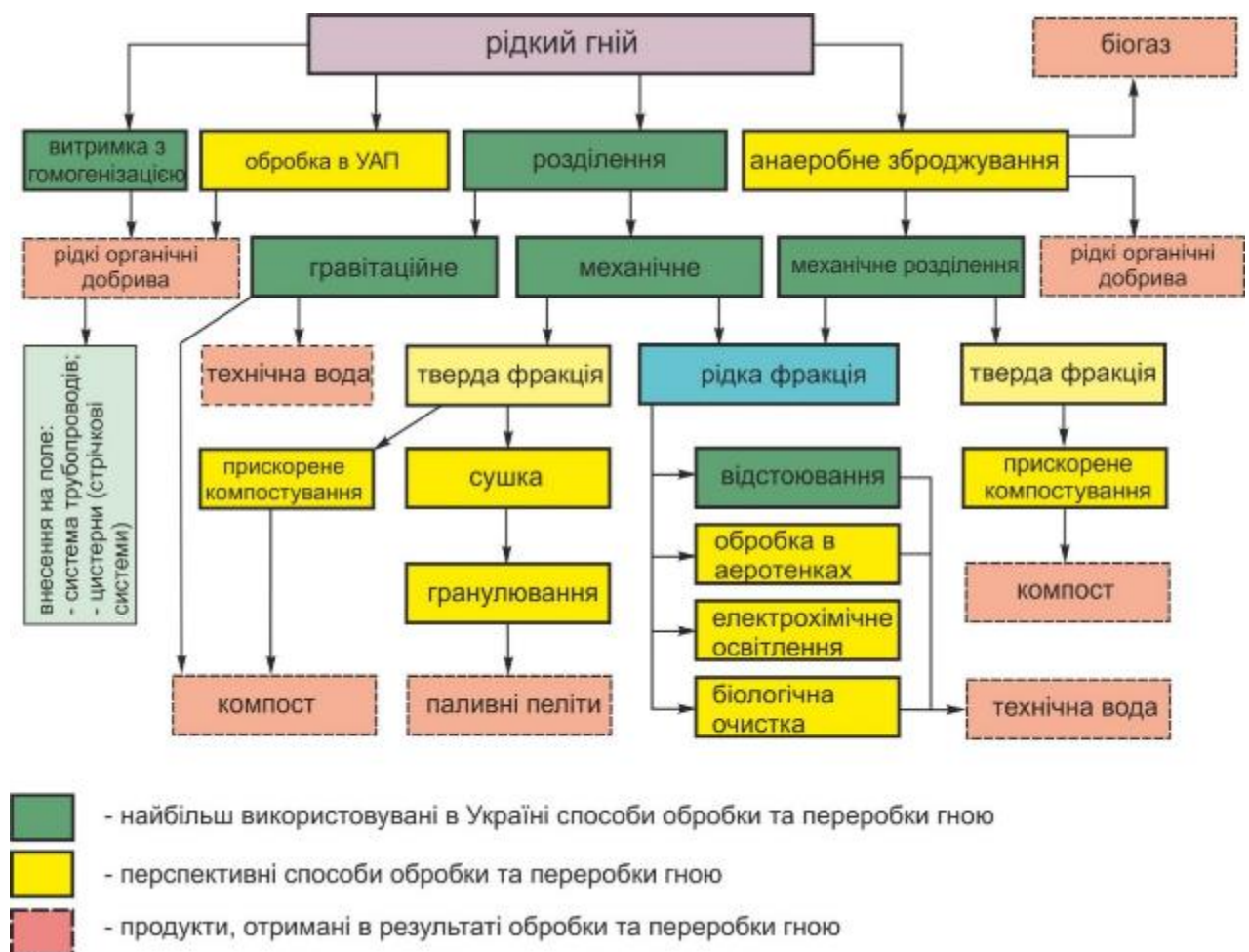


Рисунок 1.1 - Технології переробки рідкого гною

Зупинимось на подальшому використанні твердої фракції після механічного розділення. В першу чергу, це вихідний матеріал для отримання повно-

цінного органічного добрива, що містить всі поживні речовини, необхідні рослинам у достатньо збалансованому співвідношенні. Разом із збагаченням ґрунту поживними елементами внесення гною покращує його структуру. Суттєвим недоліком під час його використання як добрива є низька технологічність внесення.

Тому на сьогодні з'явилася ще одна технологія переробки твердої фракції гною – гранулювання, з подальшим використанням в якості палива або органічного добрива. В першому випадку (паливо) отримують додатковий енергоресурс, який можна використовувати безпосередньо на фермі. В другому - (добрива) гранулюванням досягають суттєве зменшення об'єму продукту, що зменшує витрати на транспортування. Крім того підвищується технологічність отриманого продукту – його внесення в ґрунт не потребує спеціальної техніки, можна використовувати обладнання для внесення мінеральних добрив.

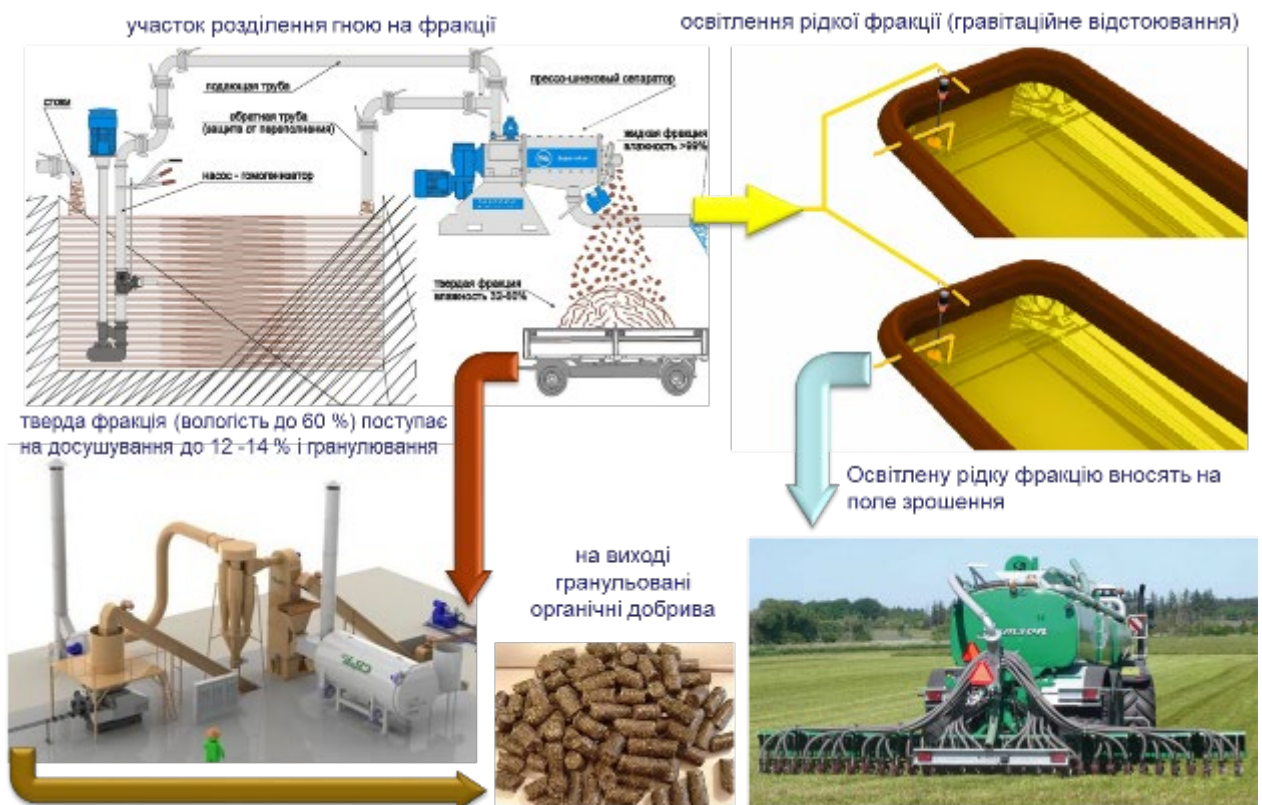


Рисунок 1.2 - Схема переробки гною з отриманням гранульованих органічних добрив

Як свідчить існуючий досвід така технологія є досить відпрацьованою та застосовується для отримання гранульованих органічних добрив з курячого посліду. При цьому використовують вальцеві прес-гранулятори з кільцевою матрицею. Що стосується твердої фракції гною свиней, то на сьогодні є невдалі приклади її застосування.



а



б



в

Рисунок 1.3 - Комплект обладнання ОГМ-0,65 (а), молоткова дробарка (б) та гранулятор з кільцевою матрицею (в)

Так в ТОВ НВП «Глобинський свинокомплекс» була спроба отримувати паливні гранули з твердої фракції гною свиней вихідною вологістю 60-70 %. Для цього було використано типовий комплект обладнання ОГМ-0,65, з гранулятором на основі кільцевої матриці (рис. 1.3).

Основними недоліками такого варіанту виявилися:

- суттєві витрати енергії на сушіння матеріалу 2,4-3,0 ГДж/т, в паливному еквіваленті – 60...70 л дизельного палива або 300 кг отриманих гранул;
- низька надійність процесу (зупинки через забивання обладнання) через невідповідність обладнання фізико-механічним характеристикам сировини;
- найбільш стабільний режим роботи при використанні матриці з фільтрами 15 мм, що не відповідає конструкції обладнання для внесення мінеральних добрив.

Ці недоліки викликані відсутністю наукового підходу до підбору обладнання, встановлення раціональних режимів його роботи.

1.2 Розробка ресурсозберігаючої технології переробки твердої фракції гною свиней на гранули

На першому етапі рідкий гній проходить підготовку до анаеробного зброджування в гомогенізаторі-підігрівачі. У цьому пристрої він нагрівається до температури, необхідної для зброджування, а також зазнає гідролізу органічних компонентів. Після цього підготовлений рідкий гній подається в біореактор, де в умовах термофільного режиму (51...53 °C) відбувається анаеробне зброджування. У результаті цього процесу утворюється біогаз, основними компонентами якого є метан (60...80%) і вуглекислий газ (20...40%). Біогаз використовується для вироблення теплоносія (гарячої води). Зброджений рідкий

гній (ЗРГ), що залишається після виділення біогазу, знезаражується від патогенних мікроорганізмів, суттєво знижується його запах, а поживні речовини мінералізуються.

На другому етапі ЗРГ підлягає поділу на рідку (з вологістю 98...99%) і тверду (органічну) фракції за допомогою зневоднення у шнековому пресі-сепараторі. Під час цього процесу видаляється до трьох чвертей вільної вологи, що дозволяє знизити вологість твердої фракції (ТФ) до 58...62%.

На третьому етапі тверда фракція додатково підсушується до рівня вологості 30...40%. Для цього використовується спеціальне сушильне обладнання, що працює на біогазі, отриманому під час анаеробного зброджування.

На четвертому етапі з підсушеної твердої фракції виготовляються гранульовані органічні добрива (ГОД). Цей процес здійснюється методом вологого гранулювання за вологості сировини 30...40% і робочого тиску 6,85 МПа.



Рисунок 1.4 – Технологічна схема ресурсозберігаючої технології переробки твердої фракції гною свиней на гранули

На п'ятому етапі виробництва гранули охолоджуються та остаточно досушуються у спеціальному обладнанні, в яке подається агент сушіння, нагрітий до температури 70...80°C. Цей процес забезпечує зменшення вологості гранул до рівня, що відповідає вимогам зберігання та транспортування готового продукту.

Рідка фракція збродженого гною свиней є екологічно чистим та біологічно активним добривом, що може застосовуватися безпосередньо для живлення рослин. Водночас тверда фракція, завдяки своєму поживному та енергетичному потенціалу, потребує додаткової обробки для отримання високоякісних гранульованих органічних добрив (ГОД), які сьогодні користуються значним попитом на ринку.

Гранулювання твердої фракції збродженого гною вирішує важливі технологічні завдання: зменшує обсяг матеріалу, необхідного для зберігання, знижує витрати на транспортування, забезпечує кращу збереженість поживних речовин і мікроелементів, а також спрощує дозування добрив під час внесення. Дослідження в області ущільнення органічних матеріалів, таких як торф, сапрпель і гній, підтверджують, що гранульована форма добрив є однією з найбільш досконалих.

З агротехнічної точки зору, використання гранульованих органічних добрив сприяє підвищенню родючості ґрунтів і врожайності сільськогосподарських культур. Встановлено, що поживні елементи з гранул поступово вивільняються у прикореневу зону рослин, створюючи локальні осередки концентрованих мікро- та макроелементів, які активно поглинаються кореневою системою. Завдяки цьому гранули забезпечують тривалий стимулюючий ефект для ґрунтової мікрофлори, що позитивно впливає на якість і кількість врожаю.

Для ефективного використання ГОД необхідно забезпечити відповідність гранул заданим фізико-механічним характеристикам: міцності, щільно-

сті, крихкості, лінійним розмірам та діаметру. Зокрема, міцність гранул є критично важливим параметром, оскільки слабкі гранули руйнуються під час транспортування, зберігання або внесення в ґрунт. Міцність гранул залежить від фізико-хімічних властивостей сировини та параметрів пресування.

Згідно з вимогами стандартів, міцність гранул повинна становити не менше 1,47 МПа, що забезпечує їх збереження під час експлуатації. Оптимальний діаметр гранул знаходиться в межах 1...4 мм, при цьому переважна більшість має діаметр 2...3,5 мм. Лінійний розмір гранул, визначений на основі досліджень, становить 5...7 мм. Ці параметри забезпечують ефективне використання добрив у сучасних агротехнологіях, включаючи одночасне внесення з насінням під час сівби.

1.3 Аналіз обладнання для гранулювання

Гранулювання сипучих твердих матеріалів здійснюється двома основними способами: обтисканням і пресуванням, вибір яких залежить від фізико-механічних та гранулометричних властивостей сировини.

Гранулювання обтисканням передбачає формування гранул за рахунок утворення агломератів із рівномірно змочених частинок або нашаруванням сухих частинок на вологі ядра, які виступають центрами гранулоутворення. Цей метод ефективно застосовується для гранулювання мінеральних добрив, наприклад, за допомогою тарільчастих грануляторів, які використовуються для обробки порошкоподібних матеріалів. Однак для органічних добрив цей метод виявився недоцільним через необхідність значного подрібнення вихідної сировини до частинок розміром до 300 мкм, що супроводжується значними енергетичними витратами.

Гранулювання пресуванням, залежно від вологості матеріалу, поділяється на сухе та вологе.

Сухе пресування проводиться за вологості сировини в межах 16...30% і включає ущільнення та зміцнення матеріалу під великим тиском з подальшим подрібненням грануляту і класифікацією продукту. Цей метод широко використовується на прес-грануляторах з кільцевими або плоскими матрицями. У таких пристроях ролики обертаються по матриці, видавлюючи гранули через її отвори. Однак через нерівномірність окружних швидкостей роликів і матриці можливий нерівномірний знос їх поверхонь.

Вологе пресування застосовується для матеріалів з вологістю 30...50%. Цей метод забезпечує формування гранул завдяки пластичності зволоженої сировини, що дозволяє зменшити витрати на подрібнення та полегшує процес гранулювання.

Для сухого пресування використовуються різні типи обладнання:

Преси з кільцевою або плоскою матрицею – гранули формуються під дією обертальних роликів, які стискають матеріал.

Шестерінчасті гранулятори – під час обертання зубчастих матриць матеріал заповнює міжзубовий простір і ущільнюється в каналах матриці, формуючи гранули розміром 10...14 мм.

Плунжерні преси – забезпечують високе зусилля пресування (120...150 МПа) і використовуються для виготовлення брикетів середніх і великих розмірів. Недоліками цього обладнання є висока енергоспоживаність, швидке зношення робочих частин через абразивний вплив частинок сировини та обмежений діапазон розмірів продукції.

Таким чином, вибір способу та обладнання для гранулювання залежить від властивостей сировини, економічних умов виробництва і вимог до кінцевого продукту.

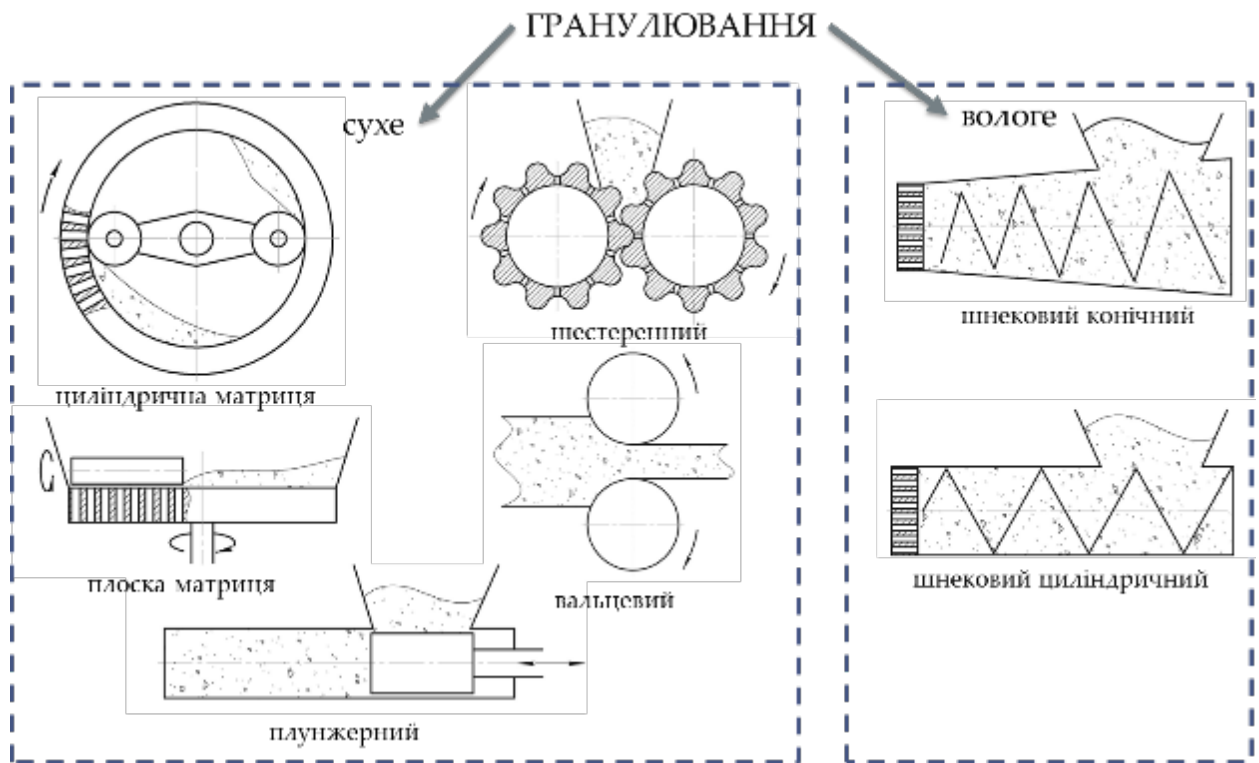


Рисунок 1.5 – Класифікація грануляторів

Вальцові формуючі преси характеризуються високою продуктивністю та здатністю створювати значні тиски пресування, що сягають 150 МПа. Оптимальна вологість матеріалу для пресування на таких установках становить близько 18%. До цього типу обладнання належать дво- та чотиривальцові преси, які виробляються провідними компаніями різних країн, зокрема:

Німеччина: «Кёпперн», «Клекнер-Гумбольдт-Дейц», «Цемах», «Кремер-Баум», «Корф», «Бепекс»;

Франція: «Ледентю», «СаютКонрер»;

США: «Юнайтед Стейтс Стіл», «Комарек-Грейвз», «AMRUTECH, Inc.»;

Україна: ЗАТ «Новокраматорський машинобудівний завод» (НКМЗ), дослідно-промислові виробництва Інституту чорної металургії ім. С.І. Некрасова.

У виробництві органічних добрив крохмаль міститься у незначних кількостях, що сприяє ефективному використанню вальцових пресів для отримання якісних гранул. Однак технологічні вимоги до низької вологості сировини (16–18%) і високого тиску (80–150 МПа) роблять сухе пресування енергоємним та дорогим процесом. Вологе пресування пропонує більш вигідний варіант гранулювання органічних матеріалів. При вологості сировини 30% і більше та робочому тиску 3–10 МПа цей метод дозволяє:

- підвищити щільність гранул у 0,5–1,5 рази;
- збільшити міцність гранул у 2,5–3,5 рази;
- зменшити їх крихкість у 1,5–3,5 рази порівняно із сухим пресуванням.

Це робить вологе пресування менш енерговитратним і економічно вигіднішим способом отримання гранул, які відзначаються високою міцністю. Це важливо для забезпечення стабільності продукту під час транспортування, зберігання та внесення в ґрунт.

Гранулювання способом вологого пресування особливо підходить для матеріалів із високою дисперсністю частинок. У процесі пресування відбувається модифікація структури матеріалу під впливом механічного стиснення та зсуву, що забезпечує формування якісних гранул.

Апаратне оформлення процесу вологого пресування подібне до конструкцій шнекових і дискових екструдерів, що дозволяє використовувати досвід інших галузей техніки для вдосконалення технології. Гранули, отримані методом пресування, поєднують високу дисперсність із міцною структурою, що робить їх стійкими до кришення та злежування.

1.4 Шляхи підвищення ефективності вологого гранулювання

Підвищення ефективності вологого гранулювання можливе шляхом оп-

тимізації фізико-механічних властивостей сировини, вдосконалення обладнання, покращення технологічного процесу, впровадження інноваційних матеріалів і технологій, а також післягрануляційної обробки. Забезпечення оптимальної вологості сировини, попередня підготовка шляхом подрібнення або кондиціонування, а також використання зв'язувальних добавок сприяють формуванню міцних і однорідних гранул. Вдосконалення конструкції шнекових пресів, матриць із покриттями для зменшення тертя та рівномірний розподіл навантаження дозволяють підвищити якість грануляції.

Покращення технологічного процесу включає регулювання температурного режиму для зниження в'язкості вологи, контроль швидкості подачі сировини та використання аерації для формування кращої структури гранул. Інноваційні підходи, такі як впровадження наноматеріалів, енергозберігаючих технологій і інтелектуальних систем керування, дозволяють зменшити енерговитрати та автоматизувати процес. Післягрануляційна обробка, зокрема охолодження, досушування та нанесення захисних покриттів, забезпечує тривалу збереженість гранул, їхню стійкість до механічних пошкоджень і покращення водостійкості.

Екологічна складова також є важливим напрямом, зокрема використання відновлюваних джерел енергії, таких як біогаз, і мінімізація викидів дрібнодисперсних частинок. Застосування цих підходів дозволяє не лише підвищити ефективність процесу, але й покращити якість гранул, знизити витрати на виробництво і транспортування та зменшити вплив на навколишнє середовище.

Реологія - наука про деформацію і перебіг реальних тіл. Між ідеально пружними твердими тілами і істинно в'язкими рідинами в природі існує велике різноманіття реальних дисперсних структурованих систем проміжного характеру, які називають реологічними тілами, до числа яких відносять тверду фракцію збродженого гною і пташиного посліду.

Тривалий час в теорії та практиці широко використовувалося рівняння Шведова-Бінгама:

$$\tau - \tau_0 = \eta \cdot \dot{\gamma}. \quad (1.1)$$

Однак в області низьких швидкостей деформації, характерних для шнекового обладнання, крива течії реальних середовищ ухилялася від прямої лінії, що підтверджувало його неспроможність.

Це послужило появі модифікації вищеназваної моделі шляхом додавання до межі плинності ступеневого закону:

$$\tau = \tau_0 + \eta_{\text{эф}} \cdot \dot{\gamma}^n, \quad (1.2)$$

де $\eta_{\text{эф}}$ - коефіцієнт ефективної в'язкості, Па·с;

n - індекс течії матеріалу.

В результаті рівняння (1.2) отримало назву Гершеля-Балклі. Було прийнято вважати його універсальним для широкого класу реальних в'язкопластичних систем. У ньому слід приділити увагу на такі величини як максимальне напруження зсуву (τ_0), при якому в матеріалі, що проявляє пружні властивості, починаються зсувні деформації (в'язкопластична течія), і показник ступеня при швидкості зсуву, званий індексом течії, який характеризує відхилення течії матеріалу від течії ньютонівської рідини.

1.5 Висновки по розділу

На основі проведених досліджень встановлено наступне:

1. Найбільш раціональною технологічною лінією переробки рідкого гною свиней є ресурсозберігаюча система, запропонована в даному розділі.

Вона забезпечує отримання біогазу, гранульованих органічних добрив (ГОД) та екологічно чистих біологічно активних добрив. Основним недоліком цієї технології є складність у забезпеченні стабільного виробництва якісного ГОД.

2. Для переробки зброджененого гною свиней оптимальним є застосування способу вологого гранулювання, який забезпечує високу якість отриманих добрив. У якості обладнання доцільно використовувати шнековий гранулятор, що дозволяє ефективно формувати гранули з необхідними характеристиками з вологої сировини.

3. Для успішного здійснення процесу вологого гранулювання необхідно теоретично обґрунтувати рух матеріалу через філь'єри шнекового гранулятора, враховуючи фізико-механічні властивості сировини.

4. Виявлено, що нестабільність процесу вологого гранулювання твердої фракції (ТФ) у шнековому грануляторі призводить до нерівномірного виходу гранул з філь'єр матриці та налипання волокнистих частинок на перегородках. Це спричиняє зниження продуктивності обладнання на 22...24% і збільшення енергетичних витрат на одиницю продукції.

Для підвищення ефективності процесу необхідно забезпечити якісну підготовку сировини перед її подачею у філь'єри, а також розробити методи очищення філь'єр матриці від волокнистих частинок.

2 ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ГРАНУЛЮВАННЯ ШНЕКОВИМ ПРЕСОМ

2.1 Обґрунтування схеми гранулятора органічних добрив

Аналіз обладнання для гранулювання дозволив вибрати шнекові гранулятори, оскільки це обладнання гарантує отримання продукту з заданими властивостями. В основі вибору був покладений шнековий гранулятор зі збірною матрицею, оснований на шнековій м'ясорубці FRICO FRU-614. Збірна матриця складається з двох частин: сталевій для формування гранул і полімерної, яка знижує напруження, що виникають в гранулах. Довжина сталевій частини матриці, визначена на основі міцнісних характеристик, становить 9 мм. Полімерна частина матриці має довжину 36 мм, що обрано на основі досліджень процесу вологого гранулювання. Діаметр філь'єр матриці, що впливає на розмір гранул, складає 3,2 мм. Робочий тиск пресування в процесі гранулювання становить 6,85 МПа.

Пошукові дослідження показали, що конструкція шнекового гранулятора має певні недоліки:

Налипання волокнистих частинок твердої фракції (ТФ) на перегородках філь'єр матриці, що призводить до зменшення їх діаметра. Попередні дослідження показали, що об'ємна витрата пресованого матеріалу через філь'єри знижується на 24–28%.

Нерівномірний потік матеріалу через філь'єри матриці, зумовлений пульсацією тиску в шнековому грануляторі перед матрицею та накопиченням недостатнього обсягу пресованого матеріалу перед нею.

В дослідженнях Варшавського В.М. було запропоновано покращити реологічні властивості пресованого матеріалу шляхом додавання сполучної речовини - хлорели в кількості 3-5% від загальної маси. Це призводить до підвищення крихкості та водостійкості гранул. Раувендаль К. визначив два стани матеріалу в шнековій камері: сипкий і в'язкопластичний. На початку матеріал

рухається у вигляді сипкого через зону завантаження, а на виході з шнекової камери він переходить у в'язкопластичний стан. Це досягається завдяки високому тиску пресування (понад 7,5 МПа), що збільшує енергоємність процесу.

Для усунення першого недоліку пропонується встановити перед матрицею лопатевий ніж, який дозволить зрізати волокнисті частинки з перегородок філь'єр та додатково продавлювати порції матеріалу через філь'єри, що знизить тиск пресування перед матрицею та збільшить продуктивність гранулятора.

Щоб усунути другий недолік, пропонується додати перед матрицею спеціальну камеру для створення зони пластикації. Це дозволить змінити структуру пресованого матеріалу з сипучого на в'язкопластичний шляхом механічного впливу, зокрема шляхом збільшення вологості ТФ до максимально можливих значень (46%), що стабілізує потік матеріалу через філь'єри матриці.

Удосконалена конструктивно-технологічна схема шнекового гранулятора включає в себе такі основні елементи: корпус, завантажувальне вікно, шнек, втулку, зону пластикації, лопатевий ніж, збірну матрицю, що складається зі сталевих та полімерних частин, а також вал шнека і ножа. Процес гранулювання твердого фракційного матеріалу відбувається наступним чином: пресований матеріал в сипучому стані подається до шнекового гранулятора через завантажувальне вікно. Далі, шнек із змінним кроком поступово ущільнює матеріал по мірі його просування. Довжина сталевих частин матриці обрана відповідно до вимог міцності і становить 6 мм. Полімерна частина матриці була визначена на основі досліджень процесу вологого гранулювання і складає 21 мм. Діаметр філь'єр, що визначає розмір отриманих гранул, дорівнює 3,2 мм.

Під час руху матеріалу до матриці, під впливом механічного тиску, він зазнає деформації, внаслідок чого відбувається видалення повітряних бульбашок. Це призводить до руйнування грудкуватої сипучої структури матеріалу, оскільки він є висококонцентрованою дисперсною системою, що складається з твердих і рідких фаз.

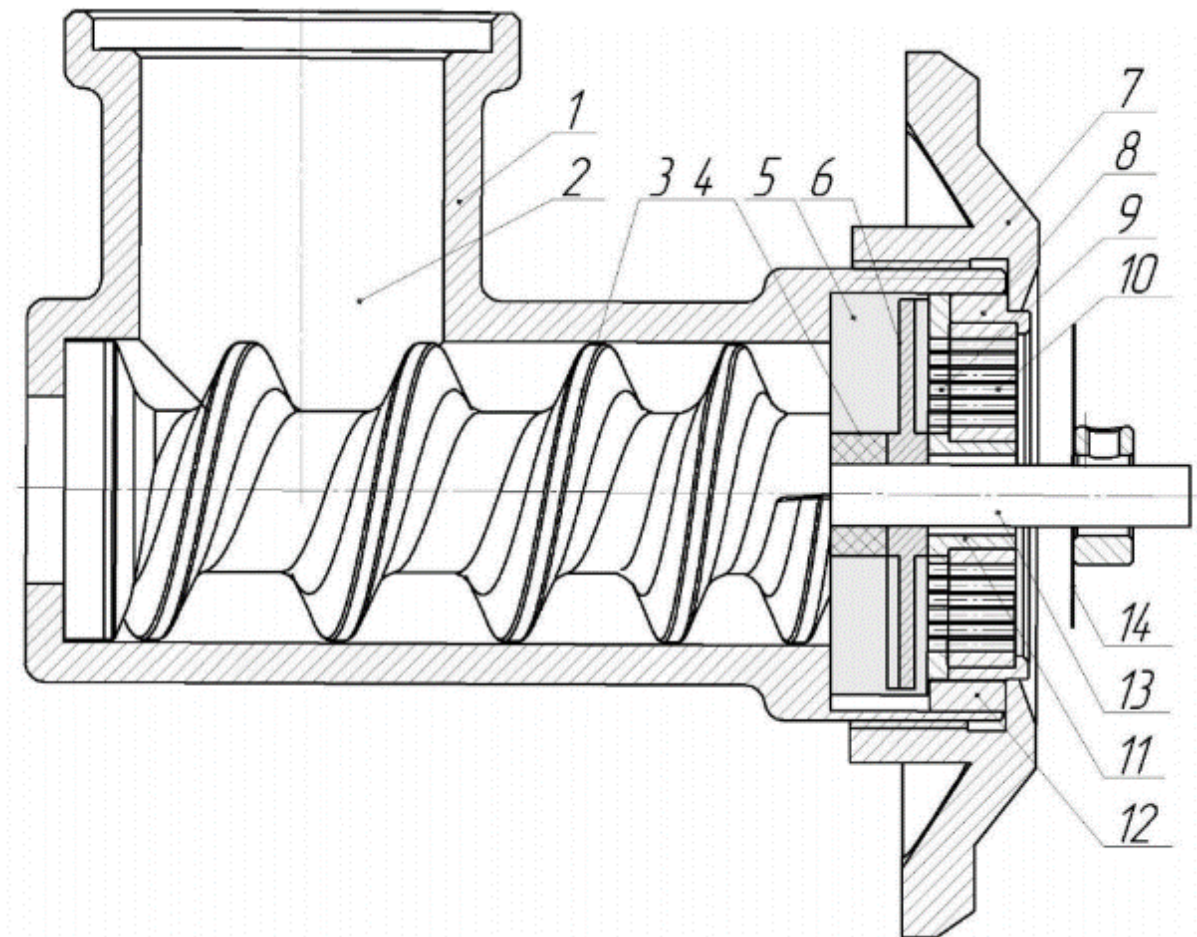


Рисунок 2.1 - Конструктивно-технологічна схема шнекового гранулятора

Тверда фаза складається на 69% з частинок розміром менше 1 мм. Механічний вплив напруги та зсуву спричиняє руйнування початкової сипучої структури матеріалу. Згодом формується однорідна суміш, яка включає рідку фазу та тверді частинки різних розмірів і форм. Під дією тиску ця суміш структурно змінюється і переходить у в'язкопластичний стан. Цей етап процесу називається пластикацією і відбувається в спеціально відведеній зоні шнекового гранулятора.

Після цього лопастний ніж, нахилившись, проштовхує порції матеріалу через фільтри матриці. Волокнисті частинки, які налипають на стінки перегородок, зрізаються, що дозволяє підтримувати працездатний стан матриці. За результатами експериментальних досліджень встановлено, що тиск пресування в зоні пластикації коливається між 0,9 і 1,24 МПа, що є достатнім для

досягнення в'язкопластичного стану пресованого матеріалу. При цьому об'ємна витрата матеріалу через фільтри матриці збільшується на 24-28%.

Аномальна поведінка в'язкості пресованого матеріалу в шнековому грануляторі пояснюється зміною структури висококонцентрованої дисперсної системи під час її витікання. В таких системах при певних швидкостях зсуву спостерігаються два протилежні процеси: руйнування просторової сітки та її відновлення.

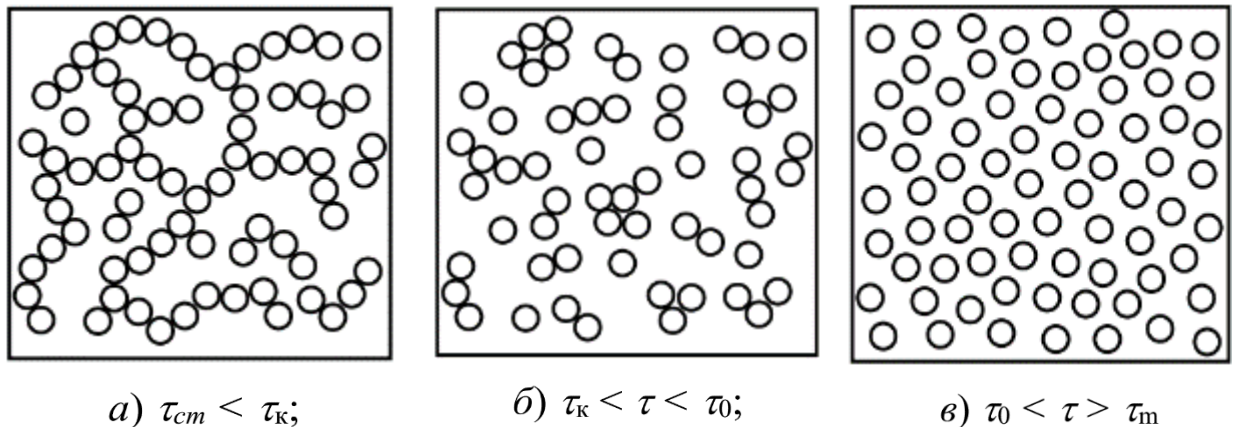


Рисунок 2.2 - Перебудова структури аномального тіла під дією зсувних напружень

При низькому значенні зсувних напружень ($\tau_{cm} < \tau_k$) швидкість течії матеріалу дуже низька, тому міжчасткові зв'язки, зруйновані в одному місці, встигають відновитися в іншому. В результаті число контактів в структурній сітці матеріалу залишається незмінним, і фактично не змінюється. Структурована система пресованого матеріалу в цій області формально тече з в'язкістю, що має максимальне значення η_{max} .

Коли зсувні напруження лежать в межах $\tau_k < \tau < \tau_0$, руйнування структури матеріалу переважає над її відновленням і в такій системі залишаються окремі фрагменти структури. Напруження τ_k відповідає початку руйнування структури матеріалу і називається критичним напруженням зсуву. Структурована система в цій області тече з постійною в'язкістю, що має значення трохи нижче η_{max} .

При великих значеннях зсувних напружень ($\tau_0 < \tau < \tau_m$) в системі залишаються індивідуальні частки, при цьому в'язкість стає незалежною від швидкості деформації і помітно знижується. Така в'язкість ще називається ефективною в'язкістю (η_{ef}) матеріалу і характеризується залежністю від діючого напруження. Вона лежить в межах мінімального і максимального значень напружень зсуву.

Таким чином продуктивність шнекового гранулятора буде значно залежати від течії пресованого матеріалу в філь'єрах матриці. Тому далі визначимо закономірності руху пресованого матеріалу в філь'єрах.

2.2 Теоретичні дослідження руху твердої фракції зброженого гною

Фільєра матриці шнекового гранулятора є трубоподібною конструкцією круглої форми, через яку пресований матеріал - тверда фаза (ТФ) - проходить під впливом тиску, створюваного шнеком. Під час процесу гранулювання матеріал продавлюється через численні фільєри матриці, і рух ТФ в цих фільєрах є важливим фактором, що визначає як продуктивність шнекового гранулятора, так і якість отриманих гранул. Тому точне розуміння виду і характеру руху пресованого матеріалу через фільєри матриці є необхідним для оптимізації процесу гранулювання.

Існують два основні види руху в'язкопластичних матеріалів: ламінарний і турбулентний. Ламінарний рух характеризується плавною, шару-ватою течією матеріалу, де кожен шар рухається окремо від інших, без значних переміщень частинок матеріалу і без коливань швидкості чи тиску. В умовах ламінарного руху, лінії течії чітко визначені формою каналу, і матеріал переміщається уздовж осі без значних поперечних переміщень.

Турбулентний рух, навпаки, супроводжується інтенсивним перемішуванням матеріалу, пульсаціями швидкості і тиску, а також хаотичними коливаннями потоку. В такому випадку вектори швидкості мають не тільки осьову

складову, але й поперечну до осі потоку, що спричиняє не тільки поздовжній рух матеріалу, а й поперечні переміщення, а також обертальні рухи окремих об'ємів матеріалу.

Для того, щоб визначити, який вид руху (ламінарний чи турбулентний) відбувається в шнековому грануляторі, необхідно розглянути рух ТФ в фільтрах матриці, які мають круглий перетин. Це дозволить зробити математичне моделювання процесу і врахувати всі фактори, що впливають на характер потоку. Оскільки матеріал у фільтрі шнекового гранулятора є в'язким і нестискаємим, рух матеріалу можна описати за допомогою рівнянь, які визначають поведінку в'язких рідин.

Для математичного опису руху в'язкого матеріалу через фільтри шнекового гранулятора використовують диференціальне рівняння Нав'є-Стокса. Це рівняння описує сталий в'язкий рух нестискаємого потоку рідини і дозволяє врахувати важливі аспекти, такі як зміни швидкості, тиску та напруги в потоці, а також їхній вплив на кінематичні властивості матеріалу. Диференціальні рівняння Нав'є-Стокса застосовуються до руху в'язкої рідини (чи в'язкопластичних матеріалів, які мають властивості рідин при високих температурах або певних умовах), і є основним інструментом для моделювання таких процесів.

Рішення рівнянь Нав'є-Стокса для конкретного процесу в шнековому грануляторі дає можливість визначити, чи буде рух матеріалу ламінарним або турбулентним, а також як ці режими впливають на ефективність гранулювання. Якщо в результаті моделювання виявляється, що потік матеріалу має турбулентний характер, це може свідчити про високі швидкості потоку та значні коливання швидкості і тиску, що може мати як позитивний, так і негативний вплив на якість гранул. Наприклад, турбулентний рух може призвести до нерівномірного формування гранул або підвищених енергетичних витрат у процесі.

Таким чином, розуміння фізичних закономірностей руху пресованого матеріалу в фільтрах шнекового гранулятора та використання рівнянь Нав'є-

Стокса для математичного опису цього процесу дозволяє оптимізувати грануляційний процес, забезпечити високу продуктивність обладнання та покращити якість кінцевої продукції.

$$\rho(\alpha) \left(\frac{\partial V_x}{\partial t} + V_x \frac{\partial V_x}{\partial x} + V_y \frac{\partial V_x}{\partial y} + V_z \frac{\partial V_x}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_e(\alpha) \frac{\partial V_x}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu_e(\alpha) \frac{\partial V_x}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu_e(\alpha) \frac{\partial V_x}{\partial z} \right) + \frac{\partial \mu_e(\alpha)}{\partial x} \frac{\partial V_x}{\partial x} + \frac{\partial \mu_e(\alpha)}{\partial y} \frac{\partial V_y}{\partial x} + \frac{\partial \mu_e(\alpha)}{\partial z} \frac{\partial V_z}{\partial x}, \quad (2.1)$$

де x, y, z - проекції вектора напруження масових сил на осі координат;

ρ - щільність, кг/м^3 ;

ν - кінематична в'язкість, $\text{м}^2/\text{с}$; P - тиск, Па ;

V_x, V_y, V_z - швидкості руху потоку матеріалу уздовж осей координат, м/с .

Диференціальне рівняння (2.1) є універсальним для опису багатьох гідродинамічних процесів руху в'язких матеріалів, включаючи рух пресованого матеріалу через фільтри шнекового гранулятора. Однак для більш точного аналізу і моделювання процесу руху матеріалу в шнековому грануляторі необхідно доповнити це рівняння конкретними граничними умовами, які враховують специфічні особливості цього процесу.

Насамперед, важливо визначити граничні умови, що стосуються швидкості потоку матеріалу в різних точках фільтри. Швидкість на стінках фільтри буде дорівнювати нулю ($v = 0$), оскільки на стінках діє силове тертя, яке повністю зупиняє рух матеріалу. У центрі фільтри швидкість потоку буде максимальна і позначається як v_0 , при цьому $v_0 \neq 0$. Це означає, що рух матеріалу в центрі фільтри відбувається швидше, ніж на її зовнішніх межах.

Крім того, для опису зміни тиску по довжині фільтри введемо позначення для різниці тиску між початковим і кінцевим кінцем фільтри: $\Delta p = (p_1 - p_2)$. Тут p_1 — це тиск на початку фільтри, а p_2 — тиск в кінці фільтри. Цей параметр дозволяє врахувати падіння тиску, яке виникає внаслідок опору по-

току матеріалу, і є важливим фактором, що впливає на ефективність гранулювання.

Оскільки аналітичне рішення рівняння (2.1) для такого складного процесу є неможливим через об'єктивні обмеження (наприклад, наявність нелінійності в рівняннях руху в'язких матеріалів і зміни їхніх властивостей під впливом тиску), використання теорії подібності є ефективним підходом. Зокрема, застосування методу подібності дозволяє вивести критеріальні залежності між основними величинами, які визначають характер і тип руху пресованого матеріалу при процесі вологої грануляції.

Для опису руху пресованого матеріалу в шнековому грануляторі ми можемо застосувати модель, яка ґрунтується на теорії псевдопластичних тіл, зокрема на математичній моделі Гершеля-Балклі (рівняння 1.2), що дозволяє точно описувати в'язко-пластичні матеріали. Ця модель є ефективною для аналізу руху пресованого матеріалу через фільтри матриці, оскільки вона враховує реологічні властивості матеріалу, такі як його здатність змінювати в'язкість під впливом напруги.

Задача опису руху матеріалу в шнековому грануляторі зводиться до аналізу рівнянь руху, що відбуваються по осі абсцис (OX), тобто вздовж фільтри матриці. Розглянемо рівняння проекції руху по осі абсцис OX, яке є частиною системи рівнянь Нав'є-Стокса або спеціалізованого рівняння для в'язкопластичних матеріалів. У цьому рівнянні враховуються сили тертя, тиск, швидкість потоку та інші важливі параметри, які визначають процес руху матеріалу через фільтру.

Теорія подібності, в свою чергу, дозволяє спростити складні рівняння і знайти критеріальні залежності, які будуть використовуватися для визначення видів руху матеріалу (ламінальний чи турбулентний) і їх впливу на продуктивність і якість гранулювання. Такий підхід дає змогу створювати узагальнені критерії для оптимізації процесу гранулювання та дозволяє ефективно застосовувати різні параметри в реальних умовах виробництва.

Таким чином, перехід до математичного опису через рівняння Нав'є-

Стокса або рівняння Гершеля-Балклі дає можливість точніше моделювати рух пресованого матеріалу в шнековому грануляторі і сприяє розумінню механізмів, які впливають на результати процесу гранулювання. Це забезпечує підвищення якості кінцевого продукту та оптимізацію енергетичних витрат на виробництво гранул.

$$\frac{dv_x}{dt} + v_x \frac{\partial v_x}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_x}{\partial y} + v_z \frac{\partial v_x}{\partial z} = x - \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} + \nu \Delta v_x. \quad (2.2)$$

Після проведення необхідних перетворень в рівнянні (2.2), переходячи від масштабів подібності до критеріїв подібності, отримаємо вираз, який дозволить нам описати процес руху пресованого матеріалу через фільтри матриці шнекового гранулятора з урахуванням специфічних характеристик цього процесу. У процесі цього перетворення ми враховуємо такі фактори, як швидкість потоку, тиск, в'язкість матеріалу та геометрію фільтри, що дозволяє отримати критерії для різних типів течії (ламінарної або турбулентної) та їх впливу на якість гранул.

$$\frac{l_t}{v \cdot t} = 1, \frac{q \cdot l_q}{v^2} = 1, \frac{P \cdot l_p}{\rho \cdot v} = 1, \frac{\nu}{v \cdot l_v} = 1. \quad (2.3)$$

Як видно, для забезпечення динамічної подібності течії в'язкої нестискаємої рідини (в нашому випадку — твердої фракції рідкого гною свиней) в фільтрах матриці шнекового гранулятора під дією тиску, створеного робочим органом — шнеком, необхідно виконати кілька умов. Це включає виконання чотирьох співвідношень для двох будь-яких точок фільтри, де всі члени рівняння (2.3) являють собою безрозмірні числа. У практичному застосуванні часто використовують зворотні значення безрозмірних величин, які подаються у вигляді критеріїв гідродинамічної подібності: числа Фруда (Fr), Рейнольдса (Re), Ейлера (Eu) та Струхаля (Sh).

Критерій Фруда (Fr) характеризує відношення сил інерції до сил тяжіння в потоці. Критерій Струхаля (Sh) оцінює нестационарність процесу, тобто коливання швидкості або тиску в потоці. Критерій Рейнольдса (Re) визначає відношення сил інерції до молекулярного тертя в потоці. Критерій Ейлера (Eu) дає міру відношення сил тиску до інерційних сил в потоці.

У нашому випадку, процес течії матеріалу в фільерах гранулятора описується критеріями Ейлера та Рейнольдса, оскільки ці критерії адекватно характеризують властивості течії в'язкопластичного матеріалу. Інші критерії, як-от Fr і Sh, не підходять для опису потоку твердої фракції рідкого гною через фільери матриці шнекового гранулятора.

Таким чином, основними критеріями подібності, які стосуються в'язкопластичної течії матеріалу в фільерах шнекового гранулятора, є критерії Ейлера та Рейнольдса. Важливим в цьому випадку є саме критерій Ейлера, оскільки він включає перепад тиску (Δp), який створюється шнеком на вході та виході фільер матриці.

$$Eu = f(Re) . \quad (2.4)$$

Згідно теореми подібності між усіма існуючими величинами для даного процесу має місце ступенева функціональна залежність виду

$$Eu = K \cdot Re^m, \quad (2.5)$$

де K - безрозмірний коефіцієнт пропорційності;

m - показник ступеня, постійне число.

Вид пресованого матеріалу в шнековому грануляторі впливатиме на величину показників ступеня і константу в рівнянні. Підставивши в функціональну залежність (2.5) значення критеріїв подібності отримаємо:

$$\frac{\Delta p}{\rho \cdot v^2} = K \cdot \left(\frac{v \cdot l}{v} \right)^m, \quad (2.6)$$

де Δp - перепад тисків на вході і виході з філь'єри матриці, Па;

v - швидкість руху пресованого матеріалу, м/с;

ν - кінематична в'язкість пресованого матеріалу, м²/с;

l - характерний лінійний розмір, м.

Оскільки витрати енергії на подолання сил в'язкого тертя обернено пропорційні довжині фільєри матриці, у подальшому будемо розглядати Δp як втрати тиску в фільєрі матриці. Крім того, замінимо кінематичну в'язкість на ефективну (динамічну) в'язкість $\eta_{\text{еф}}$, оскільки в умовах процесу гранулювання в'язкість матеріалу змінюється під впливом температури, вологості та інших факторів. Таким чином, рівняння (2.6) для опису течії в'язкопластичного матеріалу можна доповнити додатковим інваріантом подібності

$$\frac{\Delta p}{l \cdot \rho \cdot v^2} = K \cdot \left(\frac{v \cdot \rho \cdot l}{\eta_{\text{еф}}} \right)^m, \quad (2.7)$$

де ρ - щільність твердої фракції гною свиней, кг/м³.

Рівняння (2.7) можна перетворити в логарифмічну форму для зручності подальших розрахунків та аналізу. Логарифмічне представлення допоможе більш наочно визначити вплив кожного параметра на процес руху в'язкопластичного матеріалу в фільєрах матриці шнекового гранулятора.

Ця форма рівняння дає змогу зручно досліджувати залежності між параметрами процесу гранулювання, а також коректно оцінити вплив кожного фактору на результати. Перехід до логарифмічної форми також дозволяє застосовувати методи лінійної регресії та інші статистичні техніки для аналізу експериментальних даних.

$$\lg Eu = \lg K + m \cdot \lg (Re \cdot \Delta p / l). \quad (2.8)$$

Позначаючи $\lg Eu$ через Y , $\lg (Re \cdot \Delta p / l)$ через X , а $\lg K$ через A , запишемо

$$Y = A + mX. \quad (2.9)$$

Другий аргумент береться в якості параметра. Показник ступеня n при критерії Рейнольдса є тангенс кута нахилу однієї з прямих до осі абсцис і визначається як

$$\lg Eu = f \lg (Re \cdot \Delta p / l). \quad (2.10)$$

Постійна K визначається зі співвідношення:

$$K = Eu / (Re \cdot \Delta p / l)^m, \quad (2.11)$$

якому задовольняє будь-яка точка прямої.

Після підстановки показників ступенів і константи залежність (2.11) набуде вигляду узагальненого рівняння, що описує явище ламінарного руху пресованого матеріалу в філь'єрі матриці шнекового гранулятора

$$\frac{\Delta p}{l \cdot \rho \cdot v^2} = 0,366 \left(\frac{l \cdot \rho \cdot v}{\eta_{ef}} \right). \quad (2.12)$$

Вирішуючи рівняння (2.12) щодо шуканої величини, знайдемо, що

$$\Delta p = 0,366 \left(\frac{l^{1,27} \cdot \rho^{1,27} \cdot v^{2,27}}{\eta_{ef}^{0,27}} \right). \quad (2.12)$$

Таким чином, за результатами обчислень можна зробити висновок, що

рух матеріалу в фільєрі матриці шнекового гранулятора належить до ламінарного виду усталеного руху. Обчислене число Рейнольдса для цього процесу знаходиться в межах від 4,0 до 5,3, що є значно меншим за критичне число Рейнольдса ($Re_{кр} = 2300$). Це число є межею, після якої ламінарний рух переходить у турбулентний.

При таких значеннях числа Рейнольдса рух пресованого матеріалу зберігає характер ламінарного потоку, що вказує на відсутність інтенсивного перемішування і пульсацій в потоці, характерних для турбулентних течій. Це має важливе значення для оптимізації процесу гранулювання, оскільки ламінарний потік дозволяє досягти більш стабільного і контрольованого процесу формування гранул.

2.3 Визначення об'ємної витрати через філь'єру

Розглянемо усталений ламінарний потік матеріалу в круглій циліндричній трубі - філь'єрі матриці. Пресований матеріал рухається в філь'єрі з радіусом r , що має циліндричну форму колового перетину. При цьому лінії струму руху будуть прямими, паралельними осі філь'єри (рис. 2.3).

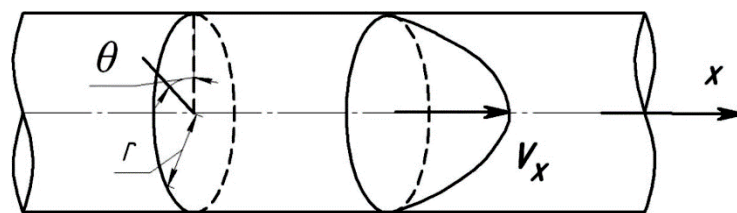


Рисунок 2.4 - Схема руху матеріалу в філь'єрі матриці шнекового гранулятора

Швидкість потоку і профіль швидкостей не залежать від поздовжньої координати. Напрямок потоку збігається з віссю X , а проекції швидкостей на осі Y і Z дорівнюють нулю: $v_y = v_z = 0$; $v_x = v$. У цьому випадку тиск, що

створюється в філь'єрі матриці, змінюється тільки уздовж осі X і не залежить від r .

Рівняння Нав'є-Стокса для сталого ламінарного руху в'язкого матеріалу в циліндричній філь'єрі уздовж осі X матиме вигляд:

$$\frac{d^2 v}{dy^2} + \frac{d^2 v}{dz^2} = \frac{l}{\eta_{ef}} \frac{dp}{dx}. \quad (2.14)$$

Якщо прямокутну систему координат замінити на циліндричну, в якій $x = x$, $y = r \cdot \cos(\theta)$, $z = r \cdot \sin(\theta)$, то рівняння (2.14) набуде вигляду:

$$\frac{d^2 v}{dr^2} + \frac{ld^2 v}{dr} + \frac{ld^2 v}{r^2 d\theta^2} = \frac{l}{\eta_{ef}} \frac{dp}{dx}. \quad (2.15)$$

Вважаючи, що потік в філь'єрі має осьову симетрію, робимо висновок, що всі параметри не залежать від змінної θ , тобто

$$\frac{d}{d\theta} = 0 \quad \text{та} \quad \frac{d^2}{d\theta^2} = 0.$$

Тоді запишемо:

$$\frac{d^2 v}{dr^2} + \frac{ld^2 v}{dr} = \frac{l}{\eta_{ef}} \frac{dp}{dx}. \quad (2.16)$$

оскільки

$$\frac{d^2 v}{dr^2} + \frac{ld^2 v}{rdr} = \frac{l}{rdr} \left(r \frac{dv}{dr} \right).$$

то рівняння Нав'є-Стокса перепишеться як:

$$\frac{l}{rdr} \left(r \frac{dv}{dr} \right) = \frac{l}{\eta_{ef}} \frac{dp}{dx}. \quad (2.17)$$

Виконаємо послідовно подвійне інтегрування.

$$v = \frac{l}{4\eta_{ef}} \frac{dp}{dx} + C_1 \ln(r) + C_2. \quad (2.18)$$

Постійні інтегрування C_1 і C_2 визначаємо з граничних умов. Для круглої філь'єри з радіусом R вони запишуться так: при $r = R$ (внутрішній радіус філь'єри) швидкість $v = 0$; при $r = 0$ швидкість v - кінцева величина. Оскільки швидкість потоку в філь'єрі повинна мати кінцеве значення (або нульове при $r = R$), а при $r \rightarrow 0$ рівняння (2.18) дасть нескінченне значення швидкості на осі, тому фізично реальний результат отримаємо лише при $C_1 = 0$.

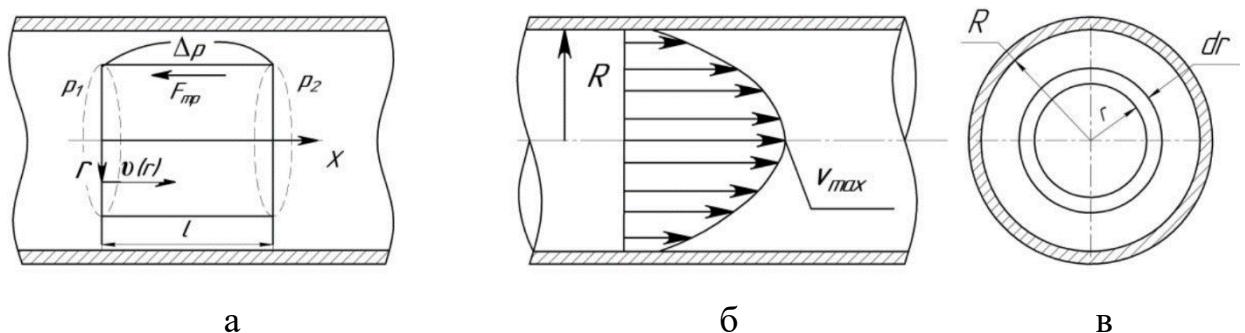


Рисунок 2.5 - Схема ламінарної течії матеріалу в філь'єрах матриці шнекового гранулятора: а - стаціонарна течія матеріалу в філь'єрі матриці; б - параболический розподіл швидкостей пресованого матеріалу по перерізу філь'єри матриці; в - поперечний переріз філь'єри матриці

Використовуючи першу граничну умову, знайдемо:

$$C_2 = -\frac{l}{4\eta_{ef}} \frac{dp}{dx} R^2.$$

і тоді поточне значення швидкості потоку матеріалу в філь'єрі дорівнюватиме

$$v = -\frac{l}{4\eta_{ef}} \frac{dp}{dx} (R^2 - r^2). \quad (2.19)$$

Отже, для круглої філь'єри маємо параболічний розподіл швидкостей пресованого матеріалу по перетину (рис. 2.5 б).

Швидкість потоку на осі філь'єри при $r = 0$ досягає максимального значення:

$$v_{\max} = -\frac{l}{4\eta_{ef}} \frac{dp}{dx} R^2. \quad (2.20)$$

Тоді,

$$v = v_{\max} \left[l - \left(\frac{r}{R} \right)^2 \right].$$

звідси видно, що просторова епюра швидкостей являє собою параболоїд обертання з основою πR^2 і висотою $v_{\max}$. Для циліндричної форми філь'єри можна записати

$$\frac{dp}{dx} = -\frac{\Delta p}{l} = \text{const},$$

де Δp - перепад тиску при пресуванні в філь'єрі матриці шнекового гранулятора в двох точках на осі x , віддалених одна від одної на відстані l рівному довжині філь'єри (рис. 2.5 а).

Визначимо середню витратну і максимальну швидкості потоку в філь'єрі матриці.

Об'ємна витрата матеріалу (Q , м³/с) через філь'єру матриці дорівнює:

$$Q = 2\pi \int_0^R v r \cdot dr = 2\pi v_{\max} \int_0^R r \left(l - \frac{r^2}{R^2} \right) \cdot dr = \pi R^2 \frac{v_{\max}}{2}. \quad (2.21)$$

Оскільки витрата Q через філь'єру матриці пов'язана із середньою швидкістю v формулою $Q = \pi R^2 v$, тому середня швидкість дорівнює $v = v_{\max}/2$. Це означає, що при ламінарному режимі усталеного руху матеріалу в філь'єрі матриці максимальна швидкість потоку вдвічі більше середньої. Це важлива властивість ламінарного усталеного руху. Так, при стаціонарному русі матеріалу через фільєру матриці шнекового гранулятора на матеріал будуть діяти гальмуючі сили в'язкого тертя з боку стінок фільєри. Це призводить до того, що швидкість руху матеріалу буде неоднотипною по поперечному перерізу. Швидкість досягає максимального значення в центрі фільєри, а наближається до нуля в безпосередній близькості до стінок фільєри через вплив гальмуючих сил.

Цей ефект розподілу швидкості є характерним для ламінарного потоку, де рух матеріалу відбувається без значних турбулентних коливань і з мінімальними поперечними переміщеннями частинок. Розподіл швидкості в такому потоці можна описати за допомогою параболічної кривої, де максимальна швидкість спостерігається в осьовій частині потоку, а біля стінок швидкість прагне до нуля.

Такий розподіл швидкостей має важливе значення для ефективності гранулювання, оскільки визначає ступінь взаємодії матеріалу з філь'єрою та можливість подальшого формування гранул при проходженні через фільєри. (рисунки 2.5, б).

Використовуючи дане наближення, запишемо:

$$\bar{v} = -\frac{l}{8\eta_{\text{ef}}} \frac{dp}{dx} R^2 = -\frac{l}{8\eta_{\text{ef}}} \frac{\Delta p}{l} R^2, \quad (2.22)$$

оскільки

$$v_{\text{max}} = -\frac{l}{4\eta_{\text{ef}}} \frac{\Delta p}{l} R^2, \quad (2.23)$$

тоді об'ємний витрата матеріалу через одну філь'єру матриці, виходячи з середньої швидкості, визначиться в такий спосіб

$$Q = -\frac{\pi}{8\eta_{\text{ef}}} \frac{\Delta p}{l} R^4, \quad (2.24)$$

Підставляючи в рівняння 2.24 замість R діаметр філь'єри $R=d/2$, отримаємо

$$Q = \frac{\pi}{8\eta_{\text{ef}}} \frac{\Delta p}{l} d^4, \quad (2.25)$$

де Q - об'ємна витрата філь'єри матриці, м³/с;

d - діаметр філь'єри, м;

η_{ef} - ефективна в'язкість матеріалу, Па·с;

Δp - перепад тиску пресування в філь'єрі матриці довжиною l, Па;

l - довжина філь'єри, м.

Аналіз рівняння (2.25) показує, що об'ємна витрата пресованого матеріалу через філь'єру матриці шнекового гранулятора в значній мірі залежить від діаметра філь'єри матриці (d^4). Отже, діаметр філь'єри матриці повинен бути завжди рівним номінальному значенню, оскільки він істотно впливає на продуктивність шнекового гранулятора.

2.4 Визначення продуктивності шнекового гранулятора

Раніше вказувалося (розділ 2.1), що для покращення прохідності пресованого матеріалу через фільєри матриці в конструкції шнекового гранулятора використовується лопатевий ніж. Цей ніж зрізає налиплі волокнисті частинки матеріалу з перегородок внутрішньої поверхні матриці та додатково сприяє просуванню матеріалу у фільєри (див. рис. 2.6).

Як видно з малюнка 2.5, фактичний діаметр фільєри d_{ϕ} зменшується через налипання на перегородках волокнистих частинок матеріалу. Це зменшення діаметра фільєри веде до зниження об'ємної витрати Q через фільєри, що можна побачити з рівняння 2.25. Тому важливо, щоб фактичний діаметр фільєри був або дорівнював, або прагнув до мінімального значення, щоб забезпечити максимальну ефективність процесу гранулювання та зберегти стабільну пропускну здатність шнекового гранулятора.

$$d_{\phi} \leq d_n.$$

Однак налипання волокнистих частинок пресованого матеріалу зменшує номінальний розмір фільєр матриці. Для врахування цього зменшення, введемо коефіцієнт k , який відображає ступінь зменшення діаметра фільєри через налипання частинок матеріалу. Таким чином, фактичний діаметр фільєри d_{ϕ} можна виразити через номінальний діаметр d_n і коефіцієнт зменшення k , який знаходиться в межах від 0 до 1, де значення, близьке до 1, вказує на мінімальне

налипання, а значення, близьке до 0, свідчить про значне зменшення діаметра фільєри через налипання частинок.

Внесення цього коефіцієнта в рівняння для об'ємної витрати дозволить коректно врахувати зміни у пропускній здатності фільєр з урахуванням впливу налипання матеріалу на стінки фільєри.

$$d_{\phi} = k \cdot d_n, \quad (2.26)$$

де d_{ϕ} - фактичний діаметр філь'єри, м;

d_n - номінальний діаметр філь'єри, м;

k - коефіцієнт, що враховує зменшення номінального діаметра філь'єри, обумовлене налипанням волокнистих частинок на перегородках матриці.

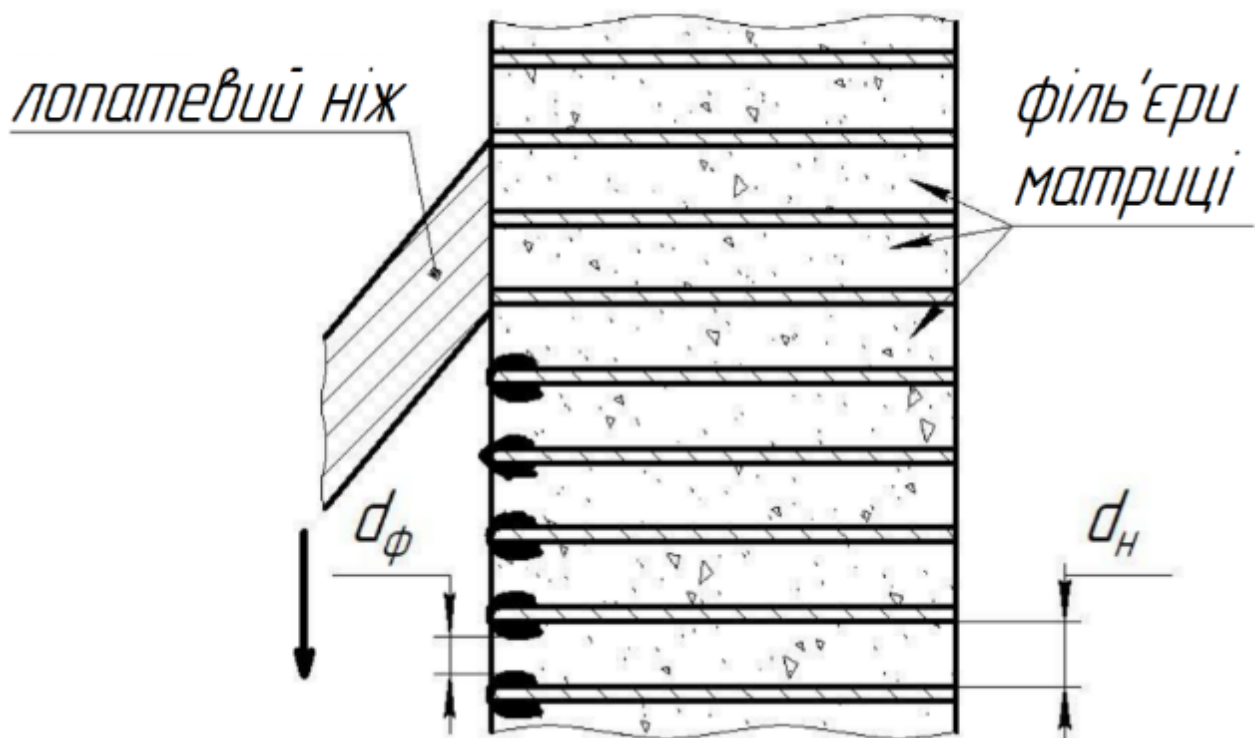


Рисунок 2.6 - Схема взаємодії лопатевого ножа і матриці шнекового гранулятора d_{ϕ} - фактичний діаметр філь'єри; d_n - номінальний діаметр філь'єри

Після підстановки (2.26) в (2.25) маємо

$$Q = \frac{\pi}{128\eta_{ef}} \frac{\Delta p}{l} (k \cdot d_n)^4, \quad (2.27)$$

Використовуючи рівняння 2.27, знайдемо продуктивність шнекового гранулятора по пресованому матеріалу:

$$\Pi = \frac{\pi}{128\eta_{ef}} \frac{\Delta p}{l} (k \cdot d_n)^4 \cdot \rho \cdot z \cdot 3600, \quad (2.28)$$

де Π - продуктивність шнекового гранулятора, кг/год;

ρ - щільність пресованого матеріалу, кг/м³;

z - число філь'єр в матриці гранулятора, шт.

У разі, коли фільєри не забиті налиплими волокнистими частинками, коефіцієнт $k=1$, що означає, що налипання не впливає на прохідність матеріалу через фільєри і не знижує продуктивність шнекового гранулятора. Однак, коли фільєри забиваються частинками, коефіцієнт k зменшується, що призводить до зменшення ефективності процесу гранулювання.

Зниження коефіцієнта $k<1$ означає, що фактичний діаметр фільєр зменшується, що пропорційно зменшує об'ємну витрату Q через фільєри, оскільки в рівнянні для витрати об'ємного потоку діаметр фільєри зводиться до четвертого ступеня. Це зменшення може помітно знизити продуктивність шнекового гранулятора, оскільки навіть невелика зміна діаметра фільєри має значний вплив на загальний потік через фільєри.

Тому для підтримки ефективності гранулювання необхідно мінімізувати налипання частинок на стінках фільєр, або застосовувати методи очищення фільєр для забезпечення стабільної продуктивності гранулятора.

2.5 Визначення потужності шнекового гранулятора

Процес вологого пресування матеріалу в шнековому грануляторі справді вимагає значних енергетичних витрат, оскільки в процесі здійснюється значне стискання та переробка матеріалу. Потужність, що витрачається шнековим гранулятором при пресуванні матеріалу, можна розрахувати за допомогою формули, що враховує силу тиску, швидкість руху матеріалу та ефективність роботи шнека.

$$N_z = \frac{1}{\eta_{ш}} \cdot (N_1 + N_2 + N_3 + N_4), \quad (2.29)$$

Швидкість переміщення матеріалу v залежить від розмірів шнека, його швидкості обертання та характеристики матеріалу. Для точного визначення потужності може бути потрібний комплексний аналіз, який включає всі фактори, що впливають на роботу гранулятора.

Потужність, що витрачається на транспортування пресованого матеріалу від приймальної частини до зони пластикації, може бути виражена:

$$N_1 = Q_{ш} \cdot \rho \cdot L \cdot f \cdot g, \quad (2.30)$$

де $Q_{ш}$ - об'ємна продуктивність шнека, $\text{м}^3/\text{с}$;

ρ - щільність переміщуваного матеріалу, $\text{кг}/\text{м}^3$;

L - довжина шнека, м ;

f - коефіцієнт тертя матеріалу по поверхні циліндра шнекового гранулятора;

g - прискорення вільного падіння, $\text{м}/\text{с}^2$.

Потужність, що витрачається на подолання в'язкої течії матеріалу в зоні пластикації (рис. 2.7) визначається за формулою:

$$N_2 = Q_{пл} \cdot p_{пл}, \quad (2.31)$$

де $Q_{пл}$ - об'ємна продуктивність зони пластикації, м³/с;

$p_{пл}$ - тиск в зоні пластикації, Па.

Об'ємна продуктивність зони пластикації дорівнює

$$Q_{пл} = \frac{\pi (R_{пл}^4 - r_{пл}^4)}{8\eta_{ef}} \frac{p_{пл}}{L_{пл}}, \quad (2.32)$$

де $R_{пл}$, $r_{пл}$ - зовнішній і внутрішній діаметр зони пластикації, м;

$p_{пл}$ - тиск в зоні пластикації, Па;

$L_{пл}$ - довжина зони пластикації, м.

Розрахуємо потужність, що витрачається на опір лопатевого ножа (рис. 2.8) за формулою:

$$N_3 = \pi \cdot n \cdot p_{лн} (R_{лн}^4 - r_{лн}^4) \cdot L_{лн} \cdot \operatorname{tg} \varphi \cdot b, \quad (2.33)$$

де $R_{лн}$, $r_{лн}$ - зовнішній і внутрішній діаметр лопаті ножа, м;

$p_{лн}$ - тиск на лопатях ножа, Па;

$L_{лн}$ - товщина лопатевого ножа, м;

$S_{лн}$ - ширина лопаті ножа, м;

b - число лопатей у лопатевого ножа, м;

φ - кут нахилу лопаті ножа, град.

Потужність, що витрачається на ущільнення і прошовування пресованого матеріалу через філь'єри матриці:

$$N_4 = A_{пр} \cdot n \cdot T_{ф} \cdot v_{ф}, \quad (2.36)$$

де $A_{пр}$ - робота пресування, Дж;

$T_{ф}$ - сила тертя матеріалу по поверхні отворів філь'єри матриці, Н;

$v_{ф}$ - швидкість продавлювання матеріалу крізь філь'єру, м/с;

У свою чергу роботу пресування можна виразити формулою:

$$A_{np} = \sigma \cdot a \cdot V, \quad (2.37)$$

де σ - об'ємне напруження стиснення, Па;

a - коефіцієнт, що характеризує зменшення обсягу пресованого матеріалу, величина якого залежить від тиску пресування;

V - об'єм пресованого матеріалу, що подається за один оберт шнека, м³.

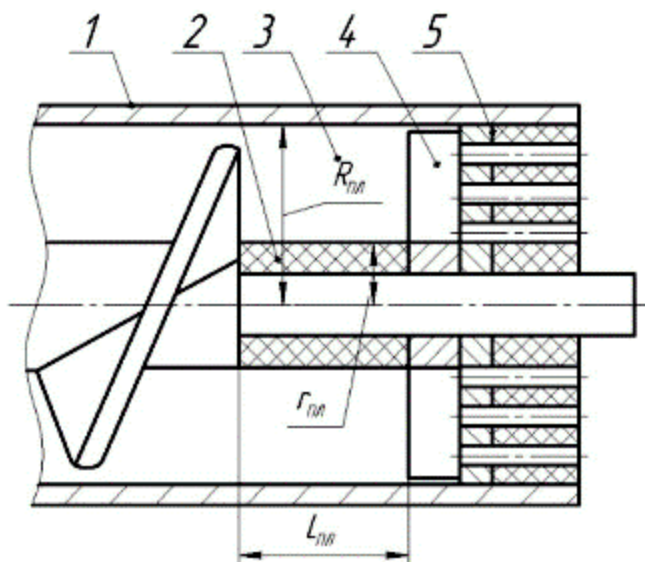


Рисунок 2.7 - Схема до визначення потужності на подолання внутрішнього тертя матеріалу в зоні пластикації: 1 - корпус; 2 - втулка; 3 - зона пластикації; 4 - лопатевий ніж; 5 - матриця

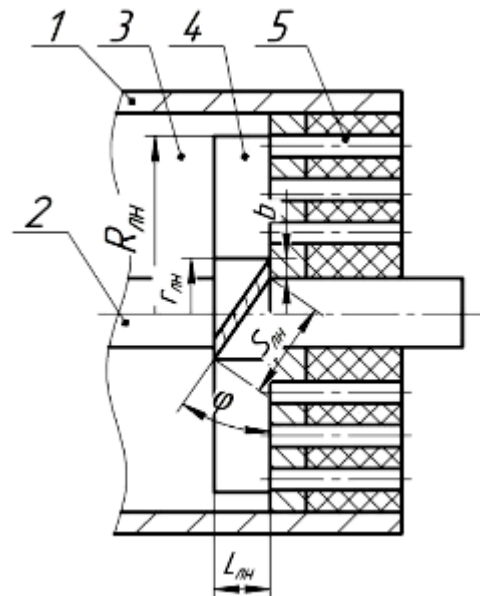


Рисунок 2.8 - До визначення потужності, що витрачається на опір лопатевого ножа: 1 корпус; 2 - вал шнека; 3 - зона пластикації; 4 - лопатевий ніж; 5 - матриця

2.6 Висновки по розділу

1. Конструктивно-технологічна схема шнекового гранулятора: Запропоновано варіант шнекового гранулятора, що оснащений лопатевим ножом, який виконує дві ключові функції:

- зрізає волокнисті частинки, що налипають на перегородках фільтр матриці, таким чином фактичний діаметр фільтр збільшується до номінального, що покращує прохідність матеріалу.

- лопатевий ніж також надає додатковий імпульс пресованому матеріалу, допомагаючи йому рухатися через фільтри матриці завдяки нахилу лопатей ножа, що збільшує ефективність процесу гранулювання.

2. Визначення об'ємної витрати та продуктивності: отримано формули для визначення об'ємної витрати пресованого матеріалу Q і продуктивності шнекового гранулятора P , які залежать від діаметра фільтри матриці d і тиску пресування p . Оскільки залежність від діаметра фільтри в рівняннях (2.27 і 2.28) описується через четвертий ступінь, цей параметр має найбільший вплив на ефективність роботи шнекового гранулятора, зокрема на об'ємну витрату.

3. Вплив налипання волокнистих частинок: виявлено, що в процесі гранулювання діаметр фільтри зменшується в результаті налипання волокнистих частинок на перегородках матриці. Початковий діаметр фільтри d_n зменшується до фактичного діаметра d_f , що знижує об'ємну витрату матеріалу через фільтри, і, як наслідок, зменшує продуктивність шнекового гранулятора.

4. Аналіз потужностей шнекового гранулятора: Розрахунок потужностей шнекового гранулятора показав, що при частоті обертання шнека в діапазоні $n=14\ldots 24$ рад/с, що відповідає швидкості зсуву $\tau=1\ldots 5$ с⁻¹, відбувається певний розподіл енергії серед компонентів процесу. Зокрема, для прийнятих параметрів шнекового гранулятора, процентні співвідношення складових потужностей виглядають наступним чином: $N_1=28,2\ldots 24,8\%$, $N_2=17,2\ldots 24,8\%$, $N_3=15,5\ldots 15,9\%$, $N_4=43,7\ldots 43,9\%$.

Ці результати підтверджують ефективність запропонованої конструктивно-технологічної схеми шнекового гранулятора з зоною пластикації та лопатевим ножом, оскільки показано, що ця схема дозволяє оптимізувати енергетичні витрати та підвищити продуктивність системи.

Таким чином, запропонована схема шнекового гранулятора з лопатевим ножом ефективно вирішує проблеми з прохідністю пресованого матеріалу через фільтри, забезпечуючи стабільний та продуктивний процес гранулювання.

3 ЛАБОРАТОРНІ ДОСЛІДЖЕННЯ МАКЕТНОГО ЗРАЗКА ШНЕКОВОГО ГРАНУЛЯТОРА

3.1 Програма лабораторних досліджень

Метою лабораторних досліджень є вивчення структурно-механічних властивостей кривих течії матеріалу в шнековому грануляторі, а також дослідження впливу різних факторів на процес гранулювання, зокрема трансформацію сипучого матеріалу в в'язкопластичний стан. Основною метою є досягнення сталого ламінарного руху матеріалу в фільєрах матриці, оцінка тиску на вході в фільєри після очищення лопатевим ножом, а також розробка реологічної моделі течії матеріалу в шнековому грануляторі.

1. Вивчення структурно-механічних і фізико-механічних властивостей матеріалу:

- визначення фізичних характеристик матеріалу, таких як щільність, вологість та склад.
- аналіз структури матеріалу для визначення його здібностей до гранулювання, включаючи вивчення його гранулометричного складу.
- оцінка в'язкопластичних властивостей матеріалу, таких як коефіцієнт тертя, пружність, пластичність, здатність до згущення та інших важливих параметрів.

2. Дослідження повних реологічних кривих течії матеріалу в шнековому грануляторі:

- проведення реологічних експериментів для отримання кривих течії матеріалу, що дозволить оцінити поведінку матеріалу в умовах різних швидкостей зсуву.
- визначення критичних точок та порогових значень для переходу від ламінарного до турбулентного руху в фільєрах шнекового гранулятора.
- вивчення змін в реологічних властивостях матеріалу залежно від температури, тиску та вологості.

3. Дослідження процесу вологого гранулювання матеріалу в шнековому грануляторі при очищенні філь'єр матриці від волокнистих включень:

- аналіз процесу вологого гранулювання матеріалу з урахуванням очищення фільєр матриці від налиплих волокнистих частинок.

- визначення впливу очищення фільєр за допомогою лопатевого ножа на ефективність гранулювання, зміни в розподілі розмірів гранул та продуктивності гранулятора.

- оцінка впливу різних методів очищення та конструктивних особливостей шнекового гранулятора на якість гранул.

4. Вивчення фізико-механічних властивостей готових гранул:

- оцінка механічних властивостей готових гранул, таких як твердість, міцність на злом, стійкість до стирання.

- вивчення структури гранул, включаючи визначення їх форми, розміру та однорідності.

- дослідження впливу технологічних параметрів гранулювання на кінцеві характеристики гранул, таких як форма, щільність та стабільність під час зберігання та транспортування.

3.2 Методика лабораторних досліджень

Для вивчення процесу вологого гранулювання ми змонтували експериментальну установку, яка була адаптована на базі пристрою FRICO FRU-615. Установка оснащена додатковими елементами, що дозволяють оцінювати ефективність процесу гранулювання, зокрема збірною матрицею, лопатевим ножом та зоною пластикації.

Пристрій FRICO FRU-615 є основною платформою для проведення експериментів і дозволяє регулювати швидкість обертання шнека, що впливає на процес гранулювання. Збірна матриця складається з ряду фільєр різного діаметра, через які пресується матеріал, даючи можливість досліджувати вплив

різних діаметрів фільтер на продуктивність і якість гранул. Лопатевий ніж встановлений для очищення перегородок матриці від налиплих волокнистих часток матеріалу. Цей елемент покращує прохідність матеріалу через фільтри, що дозволяє підтримувати стабільний процес гранулювання, мінімізуючи забивання фільтер. Зона пластикації забезпечує стабільну подачу пресованого матеріалу в фільтри матриці, підтримуючи рівномірний тиск на матеріал, що сприяє кращому формуванню гранул.



Рисунок 3.1 – Загальний вигляд експериментальної установки: 1 – електродвигун AIR80B6; 2 – приймальна горловина; 3 – гранулятор; 4 – частотний перетворювач Mitsubishi S 500

Експериментальна установка дозволяє варіювати параметри процесу гранулювання, такі як швидкість обертання шнека, вологість матеріалу, тиск

на фільтри та інші, що дозволяє вивчати їх вплив на кінцевий результат. Вона також дає змогу досліджувати ефективність очищення фільтрів від налиплих часток, що підтримує оптимальні умови для процесу гранулювання. Завдяки цій установці можна вимірювати об'ємну витрату матеріалу, продуктивність гранулятора та оцінювати якість гранул в залежності від змінних параметрів, що дає можливість комплексно досліджувати процес вологого гранулювання та його вплив на характеристики отриманих гранул і ефективність роботи шнекового гранулятора.



Рисунок 3.2 – Загальний вигляд лопатевих ножів

Отже, для дослідження процесу вологого гранулювання матеріалу в шнековому грануляторі було вирішено провести трифакторний експеримент. Для цього був обраний некомпозиційний трирівневий план Бокса-Бенкіна, який дозволяє ефективно оцінити вплив кількох факторів на результат процесу і виявити взаємозв'язки між ними. Цей план експерименту є оптимальним для вивчення впливу трьох незалежних змінних на залежну змінну (функцію відгуку), що в нашому випадку може бути об'ємною витратою або продуктивністю шнекового гранулятора.

У трирівневому плані Бокса-Бенкіна кожен фактор досліджується на трьох рівнях (мінімальний, середній та максимальний), що дозволяє визначити не тільки лінійний, а й квадратичний ефект впливу факторів на процес. Такий підхід дозволяє детально оцінити, як змінюються результати експерименту в

залежності від варіацій значень кожного фактору, а також виявити можливі взаємодії між ними.

Цей експериментальний план дозволяє виявити оптимальні параметри процесу вологого гранулювання та зрозуміти, як зміни в таких факторах, як швидкість обертання шнека, тиск пресування та вологість матеріалу, впливають на якість отриманих гранул і ефективність роботи шнекового гранулятора.

$$Y=f(X_1, X_2, X_3, \dots X_n)$$

описати рівнянням регресії другого порядку, а саме

$$y = b_0 + \sum_1^k b_i X_i + \sum_{i < j}^k b_{ij} X_i X_j + \sum_1^k b_{ii} X_i^2, \quad (3.1)$$

Результати вибору основних факторів, інтервали їх варіювання і рівнів для трифакторного експерименту зведені в таблицю 3.1.

Продуктивність шнекового гранулятора підраховували за формулою:

$$П = G_c / t, \quad (3.2)$$

де G_c - середня маса проби, кг;

t - тривалість відбору проби, ч.

Питомі витрати енергії на процес вологого гранулювання визначали за формулою:

$$N_{num} = N_e / П, \quad (3.3)$$

де N_e - потужність, що витрачається на процес вологого гранулювання, Вт;

$П$ - продуктивність шнекового гранулятора, кг/год.

Всі вимірювання проводили в триразовою повторності і заносили в журнал спостережень.

Таблиця 3.1 - Рівні та інтервали варіювання досліджуваних факторів

Показник	Частота обертів шнека гранулятора n, рад/с	Число лопатей ножа, b шт.	Вологість матеріалу W, %
Натуральне позначення	n	b	W
Верхній рівень (+1)	24	4	46
Основний рівень (0)	19	2	40
Нижній рівень (-1)	14	0	34
Інтервал варіювання факторів	5	2	6
Кодове позначення факторів	X1	X2	X3
Верхній	+1	+1	+1
Основний (нульовий)	0	0	0
Нижній	-1	-1	-1

3.3 Результати лабораторних досліджень

Результати некомпозиційного плану другого порядку Бокса-Бенкіна процесу вологого гранулювання представлені в таблиці 3.2.

Оцінка похибки середнього відгуку щодо трьох виміряних відгуків проводиться обчисленням дисперсії середнього для кожного з варіантів за формулою:

$$S_i^2 = \frac{\sum_{i=1}^2 (\bar{y} - y_i)^2}{m-1} . \quad (3.4)$$

Визначення значень коефіцієнтів рівняння регресії проводили за допомогою методу найменших квадратів. Боксом і Бенкіним для визначення коефіцієнтів рівняння регресії отримані формули, які в нашому випадку для трьох факторів мають вигляд:

$$b_0 = \frac{1}{n_0} \sum_{u=1}^{n_0} y_{0u}, \quad (3.5)$$

$$b_i = A \sum_{j=1}^N x_{ij} y_j, \quad (3.6)$$

$$b_{il} = D \sum_{j=1}^N x_{ij} x_{lj} y_j, \quad (3.7)$$

$$b_{ii} = B \sum_{j=1}^N x_{ij}^2 y_j + C \sum_{k=1}^k \sum_{j=1}^N x_{ij}^2 y_j - \frac{1}{n_0 \cdot p} \sum_{u=1}^{n_0} y_{0u}, \quad (3.8)$$

де b_0, b_i, b_{il}, b_{ii} – коефіцієнти регресії, причому $i \neq l$;

y_{0u} – значення функції відгуку в i -му досліді в центрі плану;

i – номер паралельного досліді;

n_0 – число дослідів у центрі плану;

N – кількість рядків матриці планування;

j – номер досліді в матриці планування;

i, l – номери факторів;

i_j, l_j, x, x – кодовані значення i -го і l -го факторів в j -му досліді;

j, y – значення функції відгуку в j -му досліді;

k – число факторів;

A, B, C, D, p – константи, що залежать від кількості факторів.

Після виключення незначущих коефіцієнтів рівняння приймуть вид:

$$Y_{\Pi} = 259,77 + 6,21X_1 + 60,37X_2 + 5,38X_3 - \\ - 2,7X_1X_3 + 4,65X_2X_3 + 1,44X_1^2 - 43,79X_2^2 - 1,93X_3^2 \quad (3.9)$$

$$Y_{N_{\text{max}}} = 17,256 + 0,639X_1 - 1,379X_2 - 0,755X_3 - \\ - 0,092X_1X_3 + 0,163X_2X_3 - 3,085X_1^2 - 0,692X_2^2 - 4,34X_3^2 \quad (3.10)$$

Для переходу рівнянь регресії від кодованого виду до натурального вигляду використовуємо формулу:

$$X'_j = \frac{X_j - X_j^0}{\Delta X_j}, \quad (3.10)$$

де X'_j – натуральне значення j -го фактора;

X_j^0 – основний рівень варіювання j -того фактора;

ΔX_j – інтервал варіювання j -того фактора.

Після перерахунку рівняння приймуть вигляд:

$$\Pi = -6,33 + 3,65n + 58,48b + 6,126W - 0,015nb - \\ - 0,09nW + 0,39bW + 0,058n^2 - 10,95b^2 + 0,054W^2 \quad (3.11)$$

$$N_{\text{max}} = 218,25 + 4,94n - 0,54b + 9,55W - \\ - 0,003nW + 0,0136bW - 0,123n^2 - 0,173b^2 - 0,12W^2 \quad (3.12)$$

Серед трьох регульованих факторів, що визначають процес вологого гранулювання, на параметр оптимізації продуктивності гранулятора (УП) найбільший вплив має число лопатей ножа (X_2). Це підтверджується результатами експерименту, де зміни цього фактора надають значну корекцію на збільшення продуктивності. Напроти, мінімальний вплив спостерігається у воло-

гості матеріалу (X_3), хоча її варіація також впливає на кінцевий результат. Оцінка ступеня впливу кожного фактора в різних комбінаціях їх рівнів показана на малюнку 3.3. Візуалізація цих даних показує, що при поєднанні факторів на верхніх рівнях спостерігається суттєве збільшення продуктивності гранулятора порівняно з поєднанням на інших рівнях.

Однак важливо зазначити, що збільшення вологості матеріалу понад 42 % є технологічно неможливим. Під таким високим тиском з пресованого матеріалу починає видавлюватися вільна волога, що суттєво знижує ефективність процесу. Це підкреслює необхідність обережного підходу до регулювання вологості для оптимізації процесу вологого гранулювання в межах технологічно допустимих значень.

З проведеного аналізу випливає, що для досягнення високої продуктивності гранулятора необхідно підтримувати оптимальну комбінацію факторів, зокрема, зокрема число лопатей ножа (X_2), яке має найбільший ефект. Однак варто пам'ятати про фізичні та технологічні обмеження, зокрема у випадку зволоження матеріалу, що визначає межі допустимих значень для забезпечення стабільної та ефективної роботи шнекового гранулятора.

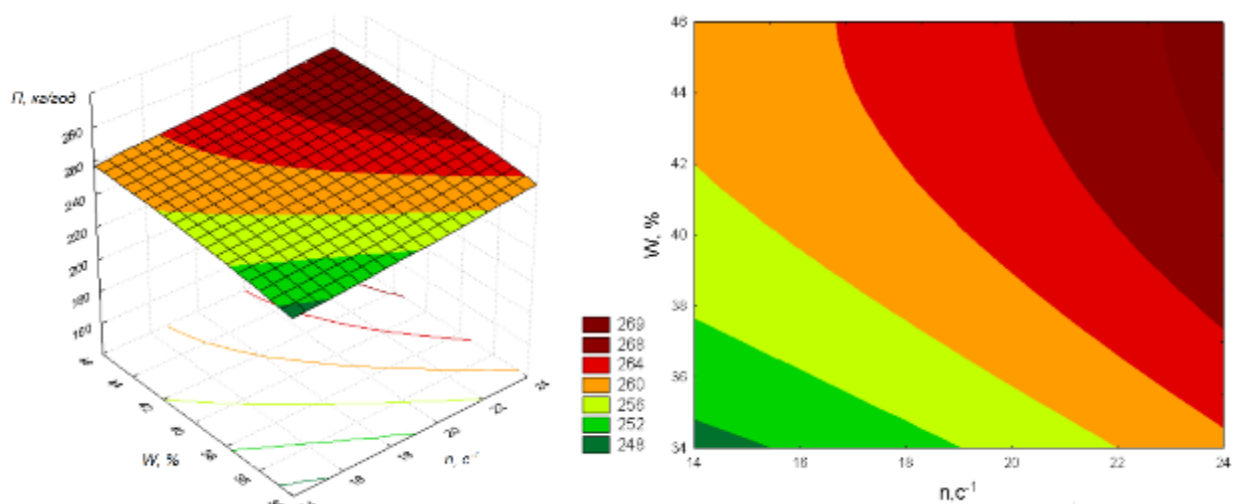


Рисунок 3.3 – Залежність продуктивності гранулятора від вологості та частоти обертання шнека при кількості лопатей ножа $b = 2$ шт

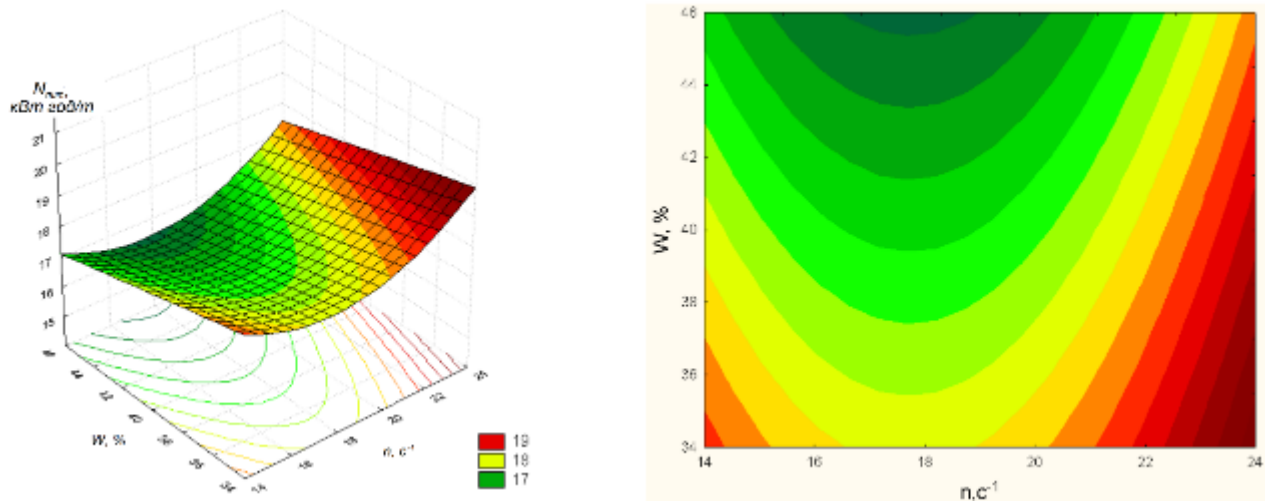


Рисунок 3.3 – Залежність питомої енергоємності гранулятора від вологості та частоти обертання шнека при кількості лопатей ножа $b = 2$ шт

Приведені поверхні відгуку та їх аналіз дозволили отримати наступні координати центрів поверхонь: для продуктивності $n = 19,26$ рад/с, $b = 3,12$ шт., $W = 54,13$ %; для потужності $n = 19,52$ рад/с, $b = 2,01$ шт., $W = 39,35$ %. Отримані значення деяких факторів є технічно або технологічно не здійсненними. Тому найбільш близькими до оптимальних прийняті значення факторів $n = 19...23$ рад/с, $b = 2$ шт., $W = 39...42$ %.

3.4 Висновки по розділу

1. Дволопатевий ніж у шнековому грануляторі ефективно виконує дві основні функції: стабільно очищає внутрішню поверхню матриці від волокнистих часток матеріалу та допомагає продавлювати матеріал у філь'єри матриці. Це забезпечує стабільний процес гранулювання та дозволяє отримувати гранули з потрібними фізико-механічними характеристиками при мінімальних енергетичних витратах. Такий підхід дозволяє знижувати рівень забруднення філь'єр та підвищувати ефективність роботи гранулятора в цілому.

2. На основі проведених досліджень та експериментальних даних були визначені оптимальні параметри роботи шнекового гранулятора, оснащеного

лопатевим ножем і зоною пластикації. Зокрема, для досягнення найкращих результатів у процесі вологого гранулювання встановлені наступні раціональні параметри: вологість пресованого матеріалу становить 39...42 %, робочий тиск на вході в філь'єри матриці дорівнює 1,24 МПа, частота обертання шнека варіюється між 19...23 рад/с, питомі енергетичні витрати складають 17,1 кВт·год/т, а продуктивність гранулятора досягає 263 кг/год. Ці значення дозволяють забезпечити стабільний і ефективний процес гранулювання з високою якістю гранул та мінімальними витратами енергії.

4 ОХОРОНА ПРАЦІ

4.1 Загальні вимоги охорони праці при роботі з системами обробки та переробки гною

Загальні вимоги охорони праці при роботі з системами обробки та переробки гною орієнтовані на захист працівників від можливих фізичних, хімічних і біологічних небезпек, а також на дотримання екологічних стандартів. Вони передбачають комплексний підхід до забезпечення безпеки, що включає аналіз ризиків, організацію роботи, навчання працівників та застосування сучасних технологій.

В Україні ці вимоги регламентуються Законом України "Про охорону праці", зокрема статтями 13 і 14, які зобов'язують роботодавця забезпечувати належні умови праці, проводити оцінку ризиків і забезпечувати працівників засобами індивідуального захисту (респіратори, захисний одяг, рукавички). Біологічні ризики, такі як патогенні мікроорганізми, що можуть міститися в гної, вимагають особливої уваги, а роботи повинні виконуватися з використанням належного обладнання та вентиляції, відповідно до ДСанПіН 3.3.2.007-98.

Європейське законодавство вимагає дотримання норм безпеки та гігієни праці відповідно до Директиви 89/391/ЄЕС, яка визначає основні принципи попередження ризиків, зокрема впливу токсичних газів (аміак, сірководень) та механічних пошкоджень. Директива 2010/75/ЄС про промислові викиди також накладає обов'язок моніторингу викидів і впровадження технологій, що мінімізують шкоду навколишньому середовищу.

Робота з гноєм передбачає дотримання правил безпечного поводження з хімічними речовинами, що утворюються в процесі ферментації, як-от аміак і метан. Умови роботи повинні забезпечувати мінімізацію контакту працівників із шкідливими речовинами завдяки автоматизації процесів і впровадженню

механізмів очищення. Обов'язковими є навчання персоналу правилам безпеки та регулярне проведення інструктажів.

Дотримання цих вимог спрямоване на запобігання травмам, отруєнням і забрудненням навколишнього середовища, а також забезпечення безперебійної та безпечної роботи систем обробки й переробки гною. Це не тільки підвищує ефективність процесів, а й відповідає міжнародним стандартам сталого розвитку.

Для забезпечення охорони праці при роботі з системами обробки та переробки гною також важливо враховувати аспекти екологічної безпеки. Українське законодавство, включаючи Закон України "Про відходи" та екологічні стандарти ДСТУ, вимагає належної утилізації побічних продуктів і дотримання санітарних норм, що запобігають забрудненню ґрунтів і водних ресурсів. Європейське законодавство у свою чергу зобов'язує впроваджувати найкращі доступні технології (Best Available Techniques, BAT), відповідно до принципів Директиви 2008/98/ЄС про відходи.

Впровадження сучасних систем обробки, таких як біогазові установки, дозволяє значно знизити екологічне навантаження та одночасно мінімізувати ризики для працівників. Такі системи потребують належного контролю температурного режиму, тиску, газових викидів, що має відповідати технічним регламентам ЄС та державним стандартам України.

Важливим аспектом є забезпечення екстреної готовності до надзвичайних ситуацій. Роботодавці мають розробляти плани евакуації та реагування на надзвичайні ситуації, включаючи витoki небезпечних газів, пожежі або вибухи. Законодавство України передбачає розробку таких планів відповідно до постанов Кабінету Міністрів України про охорону праці, а Європейські стандарти включають вимоги Директиви 96/82/ЄС (Севезо II), яка регламентує запобігання великим аваріям на виробництвах із використанням небезпечних речовин.

Дотримання вимог охорони праці під час роботи з системами обробки та переробки гною сприяє збереженню здоров'я працівників, захисту довкілля та підвищенню продуктивності за рахунок сучасних технологій і відповідального підходу до безпеки.

4.2 Проект інструкції з охорони праці при роботі з гранулятором гною

1 Загальні положення

1.1. Інструкція встановлює правила та вимоги охорони праці для персоналу, що виконує роботи на грануляторі гною.

1.2. Дотримання інструкції є обов'язковим для всіх працівників, які експлуатують, обслуговують або здійснюють ремонт гранулятора.

1.3. Роботи проводяться відповідно до Законів України "Про охорону праці", ДСТУ та внутрішніх нормативних документів підприємства.

1.4. До роботи допускаються особи, які пройшли інструктаж з охорони праці, професійне навчання, медичний огляд і володіють необхідною кваліфікацією.

2 Вимоги безпеки перед початком роботи

2.1. Перевірити справність гранулятора, засобів індивідуального захисту (ЗІЗ) та наявність необхідних інструментів.

2.2. Провести візуальний огляд електричної частини обладнання для уникнення короткого замикання або пошкоджень.

2.3. Забезпечити належну вентиляцію приміщення, щоб уникнути накопичення шкідливих газів, які можуть утворюватися під час роботи.

2.4. Ознайомитися з планом евакуації та правилами поведінки у разі виникнення надзвичайних ситуацій.

3 Вимоги безпеки під час роботи

3.1. Забороняється працювати без використання ЗІЗ, таких як захисні окуляри, рукавички, маски для дихання та спеціальний одяг.

3.2. У процесі роботи дотримуватися рекомендацій з експлуатації гранулятора, зазначених у технічному паспорті обладнання.

3.3. Під час завантаження гною не використовувати металеві або тверді предмети, які можуть пошкодити механізм гранулятора.

3.4. Не дозволяється відкривати кришки або проводити технічне обслуговування під час роботи гранулятора.

3.5. Постійно контролювати робочі параметри обладнання, такі як температура, тиск і швидкість подачі матеріалу.

4 Вимоги безпеки після закінчення роботи

4.1. Після завершення роботи зупинити обладнання, вимкнути електроживлення та провести очищення робочої зони.

4.2. Перевірити стан основних вузлів гранулятора, змастити деталі відповідно до регламенту.

4.3. Зробити запис у журналі технічного обслуговування щодо виконаних робіт і зауважень щодо роботи обладнання.

5 Дії у разі аварійних ситуацій

5.1. У разі виявлення несправностей (перегрівання, димлення, сторонні звуки) негайно припинити роботу, вимкнути живлення та повідомити керівництво.

5.2. У разі пожежі використовувати наявні засоби пожежогасіння та викликати пожежну службу.

5.3. Евакуювати працівників із небезпечної зони відповідно до плану евакуації.

6 Заключні положення

6.1. Дотримання вимог цієї інструкції є обов'язковим для всіх працівників. Порухення інструкції може призвести до дисциплінарних заходів.

6.2. Інструкція підлягає перегляду не рідше ніж раз на три роки або у разі змін технологічного процесу.

6.3. Всі зауваження та пропозиції щодо вдосконалення інструкції повинні бути подані до служби охорони праці підприємства.

4.3 Порядок дій у надзвичайних ситуаціях

Під час ракетного обстрілу важливо швидко і правильно реагувати, щоб мінімізувати ризики для життя та здоров'я. Після отримання сигналу повітряної тривоги необхідно негайно перейти в найближче укриття, яке може бути бомбосховищем, підвалом чи іншим захищеним місцем. Укриття має бути розташоване на достатній відстані від вікон і зовнішніх стін, найкраще в центрі будівлі або нижчих поверхах. Якщо до укриття дістатися неможливо, потрібно залишатися в приміщенні, відійти від вікон і зайняти місце біля внутрішніх стін, захищаючи голову руками або подушками.

На відкритій місцевості слід лягти на землю в улоговині, прикриваючи голову руками, і уникати дерев, мостів або великих конструкцій, які можуть бути пошкоджені вибухами. Після закінчення обстрілу важливо зачекати офіційного оголошення про відбій тривоги перед тим, як виходити з укриття. Слід уникати підозрілих предметів, які можуть бути боєприпасами, і негайно повідомляти про них відповідним службам.

Дотримання цих заходів, організованість та збереження спокою під час надзвичайної ситуації допоможуть зменшити ризики для життя та забезпечити вашу безпеку.

4.4 Висновки по розділу

Висновки по розділу з охорони праці мають відображати основні заходи забезпечення безпеки працівників під час експлуатації обладнання та виконання технологічних процесів. Зокрема, наголошується на важливості дотримання правил безпеки, використання засобів індивідуального захисту, своєчасного проведення інструктажів та навчання, а також моніторингу потенційних

ризиків на робочих місцях. Рекомендовано дотримання відповідного українського та європейського законодавства у сфері охорони праці, спрямованого на мінімізацію виробничих травм та підвищення ефективності роботи через забезпечення безпечних умов праці.

5 ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНА ОЦІНКА РОЗРОБЛЕНОГО ГРАНУЛЯТОРА

5.1 Вихідні дані

У даному розділі визначається передбачувана економічна ефективність застосування розробленого шнекового гранулятора. ТОВ «ТехноМашСтрой», м. Черкаси, випускає гранулятор МГК-200, що і був узятий, як аналогічний за характеристиками для порівняння.

Таблиця 5.1 – Вихідні дані

Показник	Варіанти	
	МГК-200	розроблений гранулятор
Продуктивність, т/год.	0,20	0,26
Споживана потужність, кВт	7,5	5,5
Обслуговуючий персонал, люд.	1	1
Тривалість зміни, год.	8	8
Строк служби, років	10	10
Амортизаційні відрахування	0,10	0,10
Відрахування на ТО та ремонт	0,14	0,14
Вартість, грн.	20 600	-
Інвестиції, грн.	-	16 150

5.2 Розрахунок показників економічної ефективності

Порівняння базового та вдосконаленого грануляторів здійснюється через аналіз питомих експлуатаційних витрат, які включають декілька основних складових. До цих витрат належать заробітна плата працівників, витрати на енергетичні ресурси, амортизаційні відрахування, а також витрати на ремонт і технічне обслуговування обладнання.

Для точної оцінки витрат ми використовуємо методики та рекомендації, викладені в джерелі [28]. Зокрема, ми вивчимо, як зміни у дизайні та технічних характеристиках удосконаленого гранулятора можуть призвести до зниження експлуатаційних витрат, зокрема за рахунок зменшення споживання електроенергії завдяки використанню більш ефективних двигунів або зниження витрат на технічне обслуговування завдяки використанню міцніших матеріалів.

Окрема увага буде приділена аналізу трудових витрат, оскільки вдосконалений гранулятор може підвищити продуктивність і скоротити час, необхідний для виконання робіт. Цей підхід дозволить оцінити економічні переваги нового обладнання, що сприятиме оптимізації загальних витрат на обробку гною.

Таблиця 5.2 - Показники економічної ефективності розробленого гранулятора

Показники	Варіанти		Проектований у % до базового
	МГК-200	розроблений гранулятор	
Продуктивність, т/год.	0,20	0,26	130
Споживана потужність, кВт	7,5	5,5	73,3
Персонал, люд.	1	1	100
Вартість, грн.	20 600	-	-
Інвестиції, грн.	-	16 150	-

Питомі експлуатаційні витрати, грн./т	246,96	171,40	69,404
в т.ч.: оплата праці	153,29	117,91	76,9
витрати на енергоресурси	76,87	43,36	56,4
амортизація	7,00	4,22	60,2
витрати на ТО та ремонт	9,80	5,91	60,3
Питомі приведені витрати, грн./т	257,15	179,39	69,7
Економія експлуатаційних витрат, грн.	-	22894,68	-
Строк окупності капітальних вкла- день, років	-	0,72	-
Річний економічний ефект, грн.	-	23614,15	-

5.3 Висновки по розділу

Техніко-економічне дослідження експериментального гранулятора показало, що в порівнянні з базовою моделлю МГК-200, новий гранулятор має значні переваги в плані експлуатаційних витрат. Зокрема, економія від використання удосконаленого обладнання складе 22 894,68 грн, що дозволить здійснити повне відшкодування витрат на його впровадження за 0,72 року.

Це означає, що при інтеграції нового гранулятора в виробничий процес, підприємство зможе швидко отримати фінансову вигоду завдяки зниженню витрат на енергоресурси, обслуговування та інші експлуатаційні витрати. Таким чином, інвестиції в нове обладнання є економічно доцільними і дозволяють значно підвищити ефективність виробництва в короткостроковій перспективі.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. Для підвищення механіко-технологічних характеристик органічних добрив, отриманих з твердої фракції рідкого гною свиней доцільно застосувати їх гранулювання, що значно скорочує об'єми сховищ, зменшує витрати на транспортування, підвищує збереження поживних речовин та мікроелементів, спрощує дозування та внесення.

2. Розроблено конструктивно-технологічну схему шнекового гранулятора з лопатевим ножом, який виконує дві функції - зрізає волокнисті частинки на перегородках філь'єр матриці та надає пресованій матеріалу додатковий імпульс руху крізь філь'єри матриці, за рахунок кута нахилу лопатей ножа.

3. При діаметрі матриці 100 мм, частоті обертання шнеку $14 \dots 24 \text{ с}^{-1}$ та діаметрі філь'єр 3,2 мм теоретична продуктивність гранулятора буде складати $120 \dots 260 \text{ кг/год.}$ при частоті обертання шнека гранулятора 24 с^{-1} теоретична потужність гранулятора складе $N_{\Gamma} = 3,8 \text{ кВт}$, а процентні співвідношення складових рівні: $N_1 = 23,8 \%$, $N_2 = 23,8 \%$, $N_3 = 15,8 \%$, $N_4 = 42,9 \%$.

4. Проведено аналіз стану охорони праці на місці проведення експерименту, розроблено інструкцію з охорони праці при роботі з розробленою машиною для гранулювання гною та приведено порядок дій при виникненні надзвичайної ситуації. Для забезпечення нормального зорового сприйняття через погане освітлення, було проведено розрахунок кількості світильників у лабораторії.

5. Техніко-економічне дослідження експериментального гранулятора показало, що в порівнянні з базовою моделлю МГК-200, новий гранулятор має значні переваги в плані експлуатаційних витрат. Зокрема, економія від використання удосконаленого обладнання складе $22\,894,68 \text{ грн}$, що дозволить здійснити повне відшкодування витрат на його впровадження за $0,72$ року.

БІБЛІОГРАФІЯ

1. Independent Schools Network Meeting. [Електронний ресурс] – Режим доступу: granik.com.ua/files/Biowaste_management_rus.ppt.
2. Global Development of Organic Agriculture: Challenges and Promises [Electronic resource]. – Available from: <http://orgprints.org/view/projects/DA3-GLOBALORG.html>
3. Кисіль В.І. Біологічне землеробство в Україні: проблеми і перспективи / В.І. Кисіль - Харків: Штрих, 2000. - 161с.
4. Кобець М.І. Органічне землеробство в контексті сталого розвитку [Електронний ресурс] / М.І. Кобець. – К., 2004. – 22 с. – Режим доступу: http://www.undp.org.ua/agro/pub/ua/P2004_01_051_04.pdf
5. Rauwendaal, C. Melting theory for temperature-development fluids, exact analytical solution for power law fluids / Adv. Polym. Techn. – 1992. – № 11. – Р. 19 – 25.
6. Варшавский, В.М. Гранулирование полнорационных кормосмесей для рыб: дис... канд. техн. наук. - М., 1990. – 153 с.
7. Кобець М.І. Органічне сільське господарство – що це таке? / М.І. Кобець // Пропозиція. – 2006. – № 6. – С. 58–62.
8. Національна доповідь Про стан родючості ґрунтів України / за ред. С.А. Балюка, В.В. Медведєва, О.Г. Тараріко, В.О. Грекова, А.Д. Балаєва. - К., 2010. – 112 с.
9. Офіційний сайт торгового дому «Органік ера». [Електронний ресурс]. — Режим доступу : <http://www.organicera.com.ua>
10. Павленко С.І. Новітні технічні засоби переробки органічних відходів / С.І. Павленко, О.О. Ляшенко, А.А. Поволоцький, Ю.А. Філоненко // Вісник ХНТУСГ ім. П. Василенка «Технічні системи і технології тваринництва». — Вип. №132. — Харків. — 2013. — с.193-200.

11. Огороднік А.І. Механізація приготування грибного субстрату / А.І. Огороднік, Г.А. Голуб // Техніка АПК. -. -№ 11-12. -С. 18-19.
12. Global Development of Organic Agriculture: Challenges and Promises [Electronic resource]. – Available from: <http://orgprints.org/view/projects/DA3-GLOBALORG.html>
13. Аналіз тенденцій і характеру змін стану навколишнього середовища в Україні в контексті європейської інтеграції [Електронний ресурс] – Режим доступу: <http://www.niss.gov.ua/content/articles/files/Zminy2014-244f0.pdf>
14. Мельник Л.В. Стратегічні засади раціонального землекористування в аграрних формуваннях [Електронний ресурс] / Мельник Л.В. // Науковий вісник НУБіП України. –[Електронний ресурс] Режим доступу: http://www.khntusg.com.ua/files/sbornik/vestnik_126/29.pdf.
15. Солов'яненко Н. Організаційно-економічні аспекти функціонування особистих селянських господарств в контексті розвитку земельних відносин [Електронний ресурс] / Н.Солов'яненко // Землевпорядний вісник. - 2013. - № 10. - С. 20-21 . - Режим доступу:http://nbuv.gov.ua/j-pdf/Zv_2013_10_7.pdf
16. Павленко С.І. Моніторинг органічних відходів тваринництва в Україні/ С.І. Павленко, О.О.Ляшенко, І.С. Цис // Механізація, екологізація та конвертація біосировини у тваринництві // 36. наук. Праць Інституту механізації тваринництва НААН. – Запоріжжя: ІМТ НААН, 2012. – Вип. 1(9). – С.149-157.
17. ВНТП-АПК-09.06. Відомчі норми технологічного проектування. Системи видалення, обробки, підготовки та використання гною (видання офіційне). – К.: Мінагрополітики України. 2006, 89 с.
18. Дудін В.Ю. Технологія виробництва і переробки продукції свинарства: навчальний посібник / М. Повод, О. Бондарська, В. Лихач, С. Жижка, В. Нечмілов та ін. – Київ : Науково-методичний центр ВФПО, 2021. – 360 с.

19. Повод М.Г, Дудін, В.Ю., Шпетний М.Б. Розробка основних засад щодо обґрунтованого визначення розмірів санітарно-захисних зон свиноферм: монографія, Суми, «Сумський національний аграрний університет» 2019. – 96 с., ISBN 978-617-593-059-5

20. Гранично допустимі концентрації \ГДК\ та орієнтовні безпечні рівні діяння \ОБРД\ забруднюючих речовин в атмосферному повітрі населених місць/Міністерство екології та природних ресурсів України.

21. Chen, J., D. B. McConnel, C A. Robinson, R. D. Caldwell and Y. Huang. 2002. Production and interior performances of tropical ornamental foliage plants grown in container substrates amended with composts. Compost Science & Utilization, 10:3:217-225.

22. Dassault Systems Новые возможности SolidWorks - 2013 SolidWorks Corporation / компания Dassault Systems S.A. Baker Avenue, Concord, Mass. 01742 USA.

23. Закон України «Про охорону праці»

24. НПАОП 0.00-4.21-04. «Типове положення про службу охорони праці»

25. ДСТУ 2293-99 «Охорона праці. Терміни та визначення основних понять»

26. НПАОП 0.00-6.03-93 «Порядок опрацювання і затвердження роботодавцем нормативних актів з охорони праці, що діють на підприємстві»

27. Положення «Про порядок забезпечення працівників спеціальним одягом, спеціальним взуттям та іншими засобами індивідуального захисту» (Наказ Держгірпромнагляду від 24.03.2008 року № 53).

28. ДСТУ 4397: 2005. Сільськогосподарська техніка. Методи економічного оцінювання техніки на етапі випробування. – К.: Держспоживстандарт України, 2005. – 15 с.

ДОДАТКИ

ДНІПРОВСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ АГРАРНО-ЕКОНОМІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
 Інженерно-технологічний факультет
 Кафедра механізації виробничих процесів у тваринництві

Обґрунтування робочих параметрів преса-гранулятора органічних добрив

демонстраційний матеріал до дипломної роботи освітнього ступеня «Магістр»

Виконав: студент 2 курсу, групи МгАІ-2-23
 Дешевило Олександр Сергійович

Керівник: к.т.н., доцент
 Івлєв Віталій Володимирович

Дніпро 2024

Мета і задачі досліджень

Мета дослідження. Підвищення механіко-технологічних характеристик органічних добрив отриманих з твердої фракції рідкого гною свиней шляхом обґрунтування конструкції і режимів роботи обладнання для його гранулювання. Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

- провести огляд технологій та засобів для переробки гною сільськогосподарських тварин;
- обґрунтувати конструктивно-технологічну схему шнекового гранулятора і встановити теоретичні залежності продуктивності та енергетичних витрат;
- провести лабораторні дослідження процесу отримання гранул з твердої фракції рідкого гною свиней;
- провести аналіз розроблених процесів з точки зору охорони праці;
- виконати техніко-економічну оцінку запропонованої технології переробки гною.

Об'єкт дослідження - технологічний процес вологого гранулювання твердої фракції рідкого гною свиней в шнековому грануляторі.

Предмет дослідження - закономірності технологічного процесу вологого гранулювання твердої фракції рідкого гною свиней в шнековому грануляторі.

Аналіз стану питання



Рисунок 2 - Комплект обладнання ОГМ-0,65 в ТОВ НВП «Глобінський свиногокомплекс»

- суттєві витрати енергії на сушіння матеріалу 2,4-3,0 ГДж/т, в паливному еквіваленті – 60...70 л дизельного палива або 300 кг отриманих гранул;
- низька надійність процесу (зупинки через забивання обладнання) через невідповідність обладнання фізико-механічним характеристикам сировини.

3

Аналіз стану питання



Рисунок 3 – Технологічна схема ресурсозберігаючої технології переробки твердої фракції гною свиней на гранули

4

Аналіз стану питання

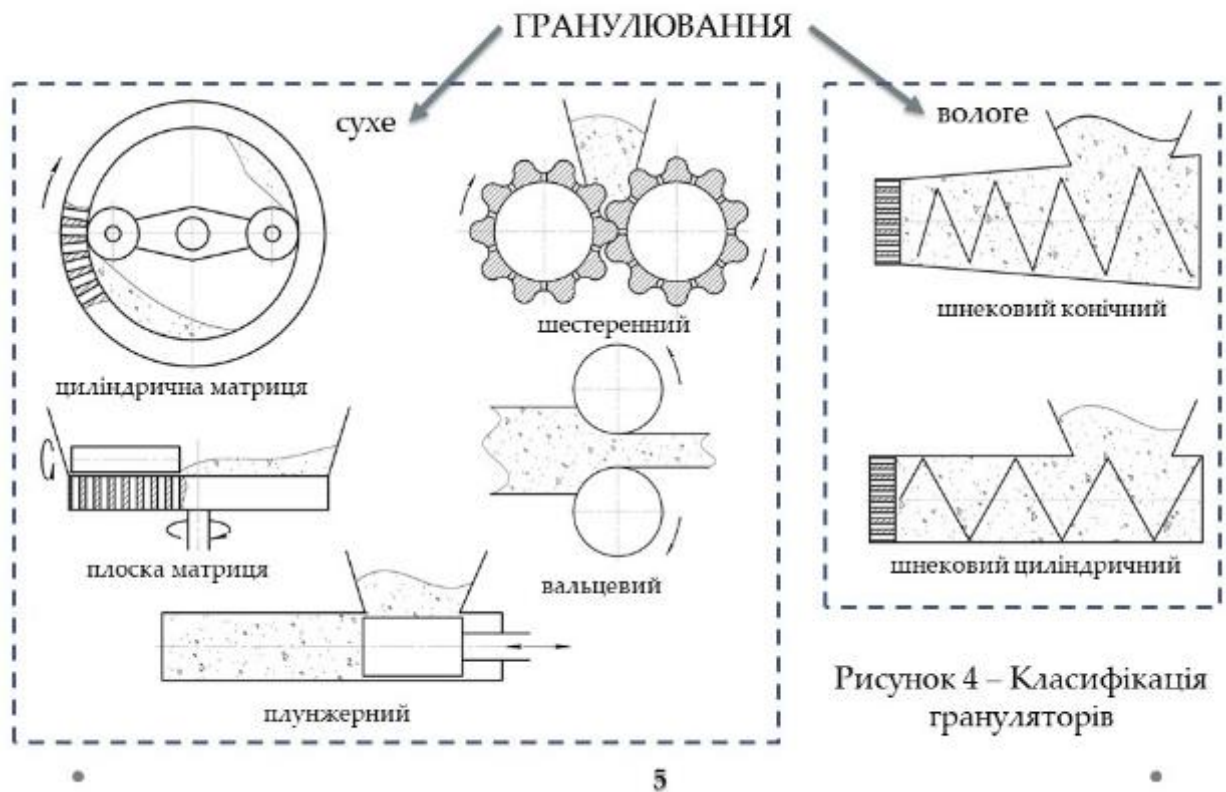


Рисунок 4 – Класифікація грануляторів

Теоретичні дослідження

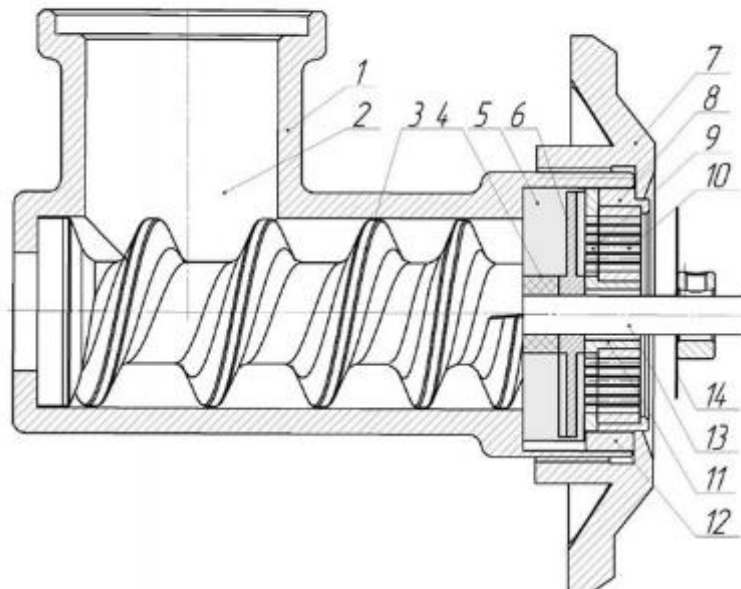


Рисунок 5 - Конструктивно-технологічна схема шнекового гранулятора з лопатевим ножом: 1 - корпус; 2 - завантажувальне вікно; 3 - шнек; 4 - втулка; 5 - зона пластикації; 6 - лопатевий ніж; 7 - гайка; 8 - збірна матриця; 9 - сталева частина матриці; 10 - фторопластова частина матриці; 11 - підшипник ковзання; 12 - шпонка; 13 - вал шнека; 14 - ніж

Теоретичні дослідження

**Визначення об'ємної витрати
через філь'єру**

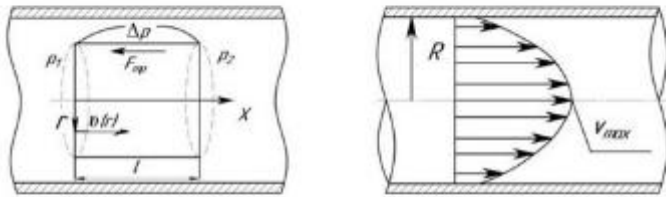


Рисунок 6 - Схема ламінарної течії матеріалу в філь'єрах матриці шнекового гранулятора

Об'ємна витрата філь'єри матриці, м³/с

$$Q = \frac{\pi}{8\eta_{\text{сф}}} \frac{\Delta p}{l} d^4,$$

де d - діаметр філь'єри, м;
 $\eta_{\text{сф}}$ - ефективна в'язкість матеріалу, Па·с;
 Δp - перепад тиску в філь'єрі матриці довжиною l, Па;
 l - довжина філь'єри, м.

При діаметрі матриці 100 мм, частоті обертання шнеку 14...24 с⁻¹ та діаметрі філь'єр 3,2 мм теоретична продуктивність гранулятора буде складати 120...260 кг/год

**Визначення продуктивності
шнекового гранулятора**

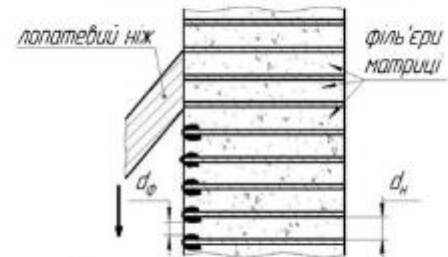


Рисунок 7 - Схема взаємодії лопатевого ножа і матриці

Продуктивність шнекового гранулятора, кг/год

$$P = \frac{\pi}{8\eta_{\text{сф}}} \frac{\Delta p}{l} (k \cdot d_*)^4 \cdot \rho \cdot z \cdot 3600,$$

d_* - номінальний діаметр філь'єри, м;
 k - коефіцієнт, що враховує зменшення номінального діаметра філь'єри, обумовлене налипанням волокнистих частинок на перегородках матриці;
 ρ - щільність пресованого матеріалу, кг/м³;
 z - число філь'єр в матриці гранулятора, шт.

7

Теоретичні дослідження

**Потужність, що витрачається
шнековим гранулятором**

$$N_{\text{г}} = \frac{1}{\eta_{\text{ш}}} \cdot (N_1 + N_2 + N_3 + N_4)$$

де N_1 - потужність, що витрачається на транспортування пресованого матеріалу від приймальної частини шнека до зони пластикації, Вт;
 N_2 - потужність, що витрачається на подолання в'язкої течії матеріалу в зоні пластикації, Вт;
 N_3 - потужність, що витрачається на опір лопатевого ножа, Вт;
 N_4 - потужність, що витрачається на ущільнення і проштовхування пресованого матеріалу крізь філь'єри матриці, Вт;
 $\eta_{\text{ш}}$ - ККД приводу шнека.

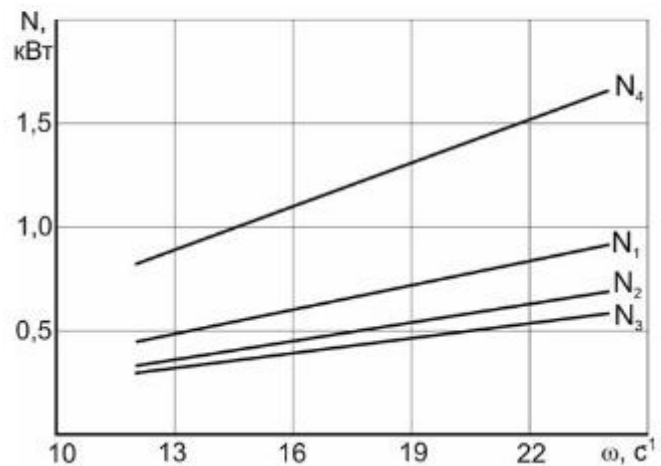


Рисунок 8 - Залежність складових потужностей гранулятора N_i від частоти обертання шнека ω

при частоті обертання шнека гранулятора $\omega=24\text{с}^{-1}$ теоретична потужність гранулятора складе $N_{\text{г}} = 3,8$ кВт, а процентні співвідношення складових рівні: $N_1 = 23,8\%$, $N_2 = 23,8\%$, $N_3 = 15,8\%$, $N_4 = 42,9\%$.

8

Експериментальні дослідження

Таблиця 1 - Рівні та інтервали варіювання досліджуваних факторів



Рисунок 9 – Загальний вигляд експериментальної установки: 1 – електродвигун АІР80В6; 2 – приймальна горловина; 3 – гранулятор; 4 – частотний перетворювач Mitsubishi S 500

Показник	Частота обертів шнека гранулятора n , рад/с	Число лопатей ножа, b шт.	Вологість матеріалу W , %
Натуральне позначення	n	b	W
Верхній рівень (+1)	24	4	46
Основний рівень (0)	19	2	40
Нижній рівень (-1)	14	0	34
Інтервал варіювання факторів	5	2	6
Кодове позначення факторів	X_1	X_2	X_3
Верхній	+1	+1	+1
Основний (нульовий)	0	0	0
Нижній	-1	-1	-1

9

Експериментальні дослідження

$$P = -6,33 + 3,65n + 58,48b + 6,126W - 0,015nb - 0,09nW + 0,39bW + 0,058n^2 - 10,95b^2 + 0,054W^2$$

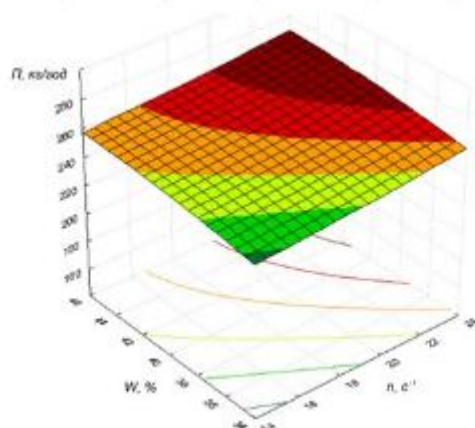


Рисунок 10 – Поверхня відгуку продуктивності гранулятора

$$N_{\text{пит}} = 218,25 + 4,94n - 0,54b + 9,55W - 0,003nW + 0,0136bW - 0,123n^2 - 0,173b^2 - 0,12W^2$$

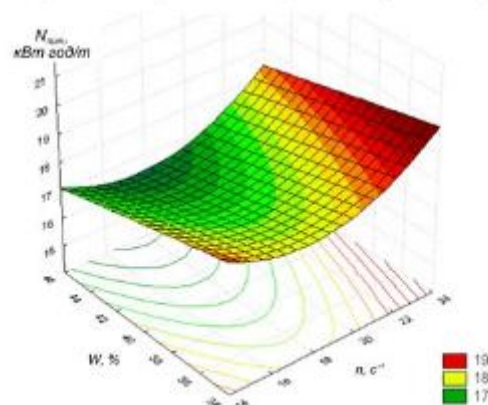
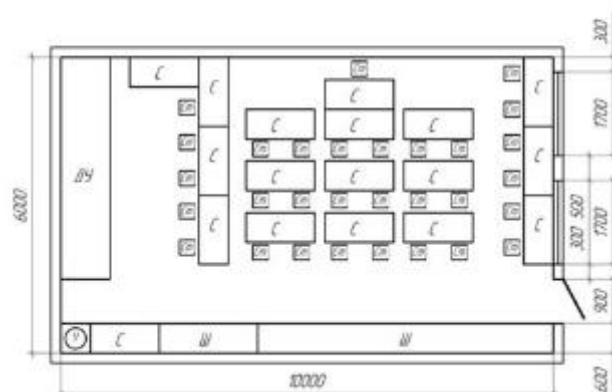


Рисунок 11 – Поверхня відгуку питомої енерговитрати

Отримано раціональні параметри роботи шнекового гранулятора: вологість пресованого матеріалу $W = 39...42$ %, частота обертання шнека $n = 19...23$ рад/с. При цьому питомі енерговитрати $N_{\text{пит}} = 17,1$ кВт·год/т і продуктивність $P = 263$ кг/год.

10

Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях



Ш – шафа; С – стіл; Ст – стілець; У – умивальник; ДУ
– лабораторний стенд доїльної установки

Рисунок 8 – Загальний вигляд приміщення лабораторії

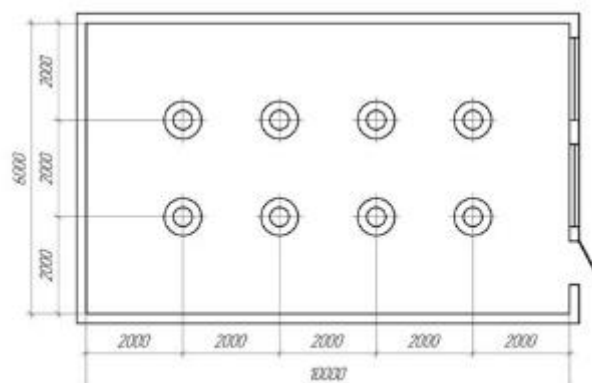


Рисунок 9 – Схема розміщення
світильників у приміщенні

Показники економічної ефективності

Показники	Варіанти		Проектований у % до базового
	МГК-200	розроблений гранулятор	
Продуктивність, т/год.	0,20	0,26	130
Споживана потужність, кВт	7,5	5,5	73,3
Обслуговуючий персонал, люд.	1	1	100
Балансова вартість, грн.	20 600	-	-
Капітальні вкладення, грн.	-	16 150	-
Питомі річні експлуатаційні витрати, грн./т	246,96	171,40	69,404
в т.ч.: заробітна платня	153,29	117,91	76,9
витрати на електроенергію	76,87	43,36	56,4
амортизаційні відрахування	7,00	4,22	60,2
витрати на ТО та ремонт	9,80	5,91	60,3
Питомі приведені витрати, грн./т	257,15	179,39	69,7
Економія експлуатаційних витрат, грн.	-	22894,68	-
Строк окупності капітальних вкладень, років	-	0,72	-
Річний економічний ефект, грн.	-	23614,15	-

Загальні висновки

1. Для підвищення механіко-технологічних характеристик органічних добрив, отриманих з твердої фракції рідкого гною свиней доцільно застосувати їх гранулювання, що значно скорочує об'єми сховищ, зменшує витрати на транспортування, підвищує збереження поживних речовин та мікроелементів, спрощує дозування та внесення. Як обладнання для вологого гранулювання можна застосувати шнековий гранулятор, який сприяє якісному формуванню гранул з вологої вихідної сировини з необхідними характеристиками.
2. Розроблено конструктивно-технологічну схему шнекового гранулятора з лопатевим ножом, який виконує дві функції - зрізає волокнисті частинки на перегородках філь'єр матриці та надає пресованій матеріалу додатковий імпульс руху крізь філь'єри матриці, за рахунок кута нахилу лопатей ножа. При діаметрі матриці 100 мм, частоті обертання шнеку $14...24 \text{ c}^{-1}$ та діаметрі філь'єр 3,2 мм теоретична продуктивність гранулятора буде складати 120...260 кг/год. при частоті обертання шнека гранулятора 24 c^{-1} теоретична потужність гранулятора складе $N_T = 3,8 \text{ кВт}$, а процентні співвідношення складових рівні: $N_1 = 23,8 \%$, $N_2 = 23,8 \%$, $N_3 = 15,8 \%$, $N_4 = 42,9 \%$.
3. В результаті лабораторних досліджень встановлено, що дволопатевий ніж дозволяє стабільно очищати внутрішню поверхню матриці від волокнистих часток матеріалу, а також продавлювати матеріал у філь'єри матриці і, таким чином, отримувати гранули з необхідними фізико-механічними характеристиками при мінімальних енергетичних витратах. Отримано раціональні параметри роботи шнекового гранулятора, з встановленим лопатевим ножом і зоною пластикації: вологість пресованого матеріалу $W = 39...42 \%$, робочий тиск на вході в філь'єри матриці $P = 1,24 \text{ МПа}$, частота обертання шнека $n = 19...23 \text{ рад/с}$, питомі енерговитрати $N_{\text{сп}} = 17,1 \text{ кВт-год/т}$ і продуктивність $\Pi = 263 \text{ кг/год}$.
4. Проведено аналіз стану охорони праці на місці проведення експерименту, розроблено інструкцію з охорони праці при роботі з розробленою машиною для гранулювання гною та приведено порядок дій при виникненні надзвичайної ситуації. Для забезпечення нормального зорового сприйняття через погане освітлення, було проведено розрахунок кількості світильників у лабораторії.
5. Техніко-економічна оцінка експериментального гранулятора показала, що в порівнянні з базовим МПК-200 він має переваги за експлуатаційними витратами. При цьому економія експлуатаційних витрат складе 22894,68 грн., що забезпечить строк окупності при впровадженні 0,72 роки.