

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

Пояснювальна записка
до дипломної роботи
освітнього ступеня "Магістр" на тему:
**Обґрунтування конструктивно-технологічних параметрів подрібнювача
стеблових кормів**

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

_____ Осмак Вячеслав Олександрович

Керівник: _____ Лупко Кристина Олегівна

Рецензент: _____ Луц Павло Михайлович

Дніпро, 2024

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

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

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

ІТС

(назва кафедри)

доцент

(вчене звання)

Дудін В.Ю.

(підпис)

(прізвище, ініціали)

«12» листопада 2024 р.

**ЗАВДАННЯ
НА ДИПЛОМНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ**

Осьмаку Вячеславу Олександровичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи: Обґрунтування конструктивно-технологічних параметрів подрібнювача стеблових кормів

керівник роботи Лупко Кристина Олегівна, доктор філософії

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

затверджені наказом вищого навчального закладу від

«12» листопада 2024 року № 3784

2. Строк подання студентом роботи 16.12.2024 року

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

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) 1. Стан і напрями досліджень. 2. Аналітичні дослідження процесу подрібнення стеблових кормів. 3. Методика чисельного моделювання і експериментальних досліджень процесу подрібнення стеблових кормів. 4. Результати чисельного моделювання і експериментальних досліджень процесу подрібнення стеблових кормів. 5. Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях. 6. Економічна ефективність подрібнювача стеблових кормів. Висновки. Список використаних джерел. Додатки

5. Перелік демонстраційного матеріалу

1. Тема. Мета і задачі досліджень (2 аркуша, А4). 2. Стан і напрями досліджень (2 аркуша, А4). 3. Аналітичні дослідження (1 аркуш, А4). 4. Методика моделювання (1 аркуш, А4). 5. Чисельне моделювання (3 аркуша, А4). 6. Висновки (1 аркуш, А4)

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
1-6	Лупко К. О., старший викладач	12.11.2024	09.12.2024
Нормоконтроль	Івлєв В. В., доцент	06.12.2024	09.12.2024

7. Дата видачі завдання: 12 листопада 2024 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

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

Студент

_____ (підпис)

Осьмак В. О.

_____ (прізвище та ініціали)

Керівник роботи

_____ (підпис)

Лупко К. О.

_____ (прізвище та ініціали)

<i>№ п/п</i>	<i>Формат</i>	<i>Позначення</i>	<i>Найменування</i>	<i>Кількість аркушів</i>	<i>Номер аркуша</i>	<i>Примітка</i>	
			<i>Текстові документи</i>				
1	A4	46ДР068000.000 ПЗ	<i>Пояснювальна записка</i>	74			
			<i>Демонстраційні матеріали</i>				
2	A4		<i>Тема. Мета і задачі досліджень</i>	2	1-2		
3	A4		<i>Стан і напрями досліджень</i>	2	3-4		
4	A4		<i>Аналітичні дослідження</i>	1	5		
5	A4		<i>Методика моделювання</i>	1	6		
6	A4		<i>Чисельне моделювання</i>	3	7-9		
7	A4		<i>Висновки</i>	1	10		
		46ДР068000.000 ПЗ					
<i>Зм.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підп.</i>	<i>Дата</i>			
<i>Розробив</i>	<i>Осьмак</i>				<i>літер</i>	<i>аркуш</i>	<i>аркуш</i>
<i>Перевірив</i>	<i>Лупко</i>					4	74
<i>Т. контр.</i>					Відомість дипломної роботи		
<i>Н. контр.</i>	<i>Івлєв</i>						
<i>Затверд.</i>	<i>Дудін</i>						
					ДДАЕУ МгАІ-2-23		

Осьмак В. О. Обґрунтування конструктивно-технологічних параметрів подрібнювача стеблових кормів. Випускна кваліфікаційна робота на здобуття освітнього ступеня «Магістр» за спеціальністю 208 «Агроінженерія». ДДАЕУ, Дніпро, 2024.

У даній роботі досліджується процес подрібнення стеблових кормів, зокрема кукурудзяної соломи, з метою підвищення ефективності виробництва кормів для тваринництва. У першому розділі розглядаються сучасний стан та напрями досліджень у виробництві кормів, фізико-механічні властивості стеблових кормів, а також аналіз існуючих подрібнювачів. Другий розділ присвячений аналітичним дослідженням процесу подрібнення, зокрема конструктивно-технологічній схемі та силам, що діють на соломі в камері подрібнення. Третій розділ описує методику чисельного моделювання та експериментальних досліджень, включаючи створення сітки молоткової дробарки та налаштування параметрів для оцінки продуктивності подрібнювача. У четвертому розділі наведено результати чисельного моделювання і експериментальних досліджень, а також оптимізацію робочих параметрів, які показали зростання ефективності подрібнення. П'ятий розділ розглядає питання охорони праці та безпеки в надзвичайних ситуаціях, а шостий – економічну ефективність роботи подрібнювача. Висновки підсумовують основні результати дослідження та вказують на важливість оптимізації процесів подрібнення для забезпечення високої продуктивності в тваринництві. Результати можуть бути корисними для подальшого вдосконалення технологій у виробництві кормів.

Ключові слова: подрібнення, стеблові корми, кукурудзяна солома, подрібнювач, молоткова дробарка, моделювання, експериментальні дослідження, ефективність

Апробація. Осьмак В. О. (2024). Обґрунтування конструктивно-технологічних параметрів подрібнювача стеблових кормів. Збірник тез III Всеукраїнської науково-практичної конференції молодих вчених «Інжиніринг технологій і технічних систем агропромислового комплексу» (15 листопада 2024 р.). Частина 1. Інжиніринг технічних систем агропромислового виробництва. Дніпро. ДДАЕУ, 152–154.

ЗМІСТ

ВСТУП	7
1 СТАН І НАПРЯМИ ДОСЛІДЖЕНЬ	8
1.1 Виробництво кормів	8
1.2 Фізико-механічні властивості стеблових кормів.....	10
1.3 Аналіз подрібнювачів стеблових кормів.....	13
1.4 Висновки з розділу	17
2 АНАЛІТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ПОДРІБНЕННЯ СТЕБЛОВИХ КОРІВ	19
2.1 Конструктивно-технологічна схема	19
2.2 Аналіз сил, що діють на соломі в камері подрібнення.....	20
2.3 Аналіз руху соломи під час процесу подрібнення	23
2.5 Висновки з розділу	26
3 МЕТОДИКА ЧИСЕЛЬНОГО МОДЕЛЮВАННЯ І ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ПРОЦЕСУ ПОДРІБНЕННЯ СТЕБЛОВИХ КОРМІВ.....	28
3.1 Створення сітки молоткової дробарки	28
3.2 Створення чисельної моделі кукурудзяної соломи.....	29
3.3 Налаштування параметрів.....	32
3.4 Оцінка продуктивності подрібнювача.....	33
3.5 Висновок з розділу.....	34
4 РЕЗУЛЬТАТИ ЧИСЕЛЬНОГО МОДЕЛЮВАННЯ І ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ПРОЦЕСУ ПОДРІБНЕННЯ СТЕБЛОВИХ КОРМІВ	36
4.1 Результати чисельного моделювання	36
4.2 Результати експериментальних досліджень	46
4.3 Оптимізація робочих параметрів подрібнювача	48
4.4 Висновки з розділу	49
5 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ	51
6 ЕКОНОМІЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ ПОДРІБНЮВАЧА СТЕБЛОВИХ КОРМІВ	56
ВИСНОВКИ.....	58
Бібліографія	60
Додатки	65

ВСТУП

Як цінний біомасовий ресурс, солома має різноманітні способи використання. Серед них технологія корму з соломи може не лише розширити джерела кормових матеріалів, підвищити коефіцієнт використання соломи та послабити протиріччя між тваринництвом і пасовищами, але й покращити екологічне середовище та сприяти розвитку солом'яного тваринництва, що має велике значення. Подрібнення є найпоширенішим способом попередньої обробки сировини в процесі виробництва кормів, і його ефективність безпосередньо впливає на якість корму та подальшу обробку. Для покращення продуктивності молоткової дробарки необхідно вивчити механізм подрібнення соломи. Через високу швидкість руху молотків у камері подрібнення та малий зазор між молотками й ситом неможливо встановити тестове обладнання, що створює нагальну проблему точного тестування процесу подрібнення кукурудзяної соломи.

Подрібнення матеріалів є надзвичайно складним процесом, і на сьогоднішній день є небагато досліджень щодо стану руху частинок матеріалу в умовах багатофазного потоку, відсутня кількісна аналітика та є мало досліджень щодо впливу вузлових частин кукурудзяної соломи на ефект подрібнення. Для розв'язання питання впливу повітряного потоку, спричиненого швидким обертанням молотків під час роботи молоткової дробарки, на подрібнення соломи, у цьому дослідженні використано метод CFD–DEM для чисельного моделювання процесу подрібнення кукурудзяної соломи, враховуючи різні фізичні параметри та робочі умови. Це дозволило змодельовати реальний процес подрібнення соломи та процес руху всередині камери подрібнення, а також поєднати це з експериментами для отримання оптимальних робочих параметрів.

Мета досліджень – вдосконалення конструктивно-технологічної схеми подрібнювача стеблових кормів і обґрунтування його параметрів для забезпечення покращення якості кормів, зниження енерговитрат та підвищення економічної доцільності.

1 СТАН І НАПРЯМИ ДОСЛІДЖЕНЬ

1.1 Виробництво кормів

Останнім часом спостерігається зниження темпів виробництва продукції тваринництва, що зумовлено, серед інших факторів, незадовільним станом кормової бази. Низька якість та недостатня кількість кормів призводять до реалізації генетичного потенціалу тварин лише на 40–90%. Корми суттєво впливають на економічні показники, оскільки їх частка в собівартості тваринницької продукції може досягати 70%. Таким чином, підвищення якості кормів, поліпшення їхньої продуктивності, а також зменшення втрат поживних речовин під час заготівлі, консервування та зберігання є важливими умовами для підвищення продуктивності тварин та загальної ефективності галузі.

У сучасних умовах науково обґрунтоване і збалансоване годування корів сучасних генотипів молочного напрямку продуктивності є важливим фактором успішного виробництва. Сучасні корови мають високий генетичний потенціал, здатний досягати 12–15 тонн молока за лактацію, проте на підприємствах промислового типу середній надій у 2023 році становив лише 7568 кг на рік на фуражну корову. На жаль, в Україні спостерігається постійне скорочення поголів'я дійних корів, що пояснюється рядом різноманітних чинників. Одним із ключових чинників цього скорочення, поряд з економічними причинами (економічна криза 1991–1997 років), є дефіцит якісних грубих кормів (сіна, сінажу) і соковитих кормів (силосу, коренеплодів), що виник у молочному секторі південних регіонів України через кліматичні зміни останніх 20–30 років. Згідно з прогнозами, до 2050 року дефіцит зелених і грубих кормів може досягти 18,43 %, при щорічному збільшенні поголів'я тварин на 4,6 %. Це підкреслює необхідність впровадження інноваційних методів і агрономічних стратегій у виробництві кормів, щоб забезпечити тварин усіма необхідними кормами протягом року.

Високі надої, плодючість корів, ріст молодняка та рентабельність молочної галузі загалом залежать від виробництва та наявності кормів. З одного боку, можна очікувати, що зміна клімату призведе до підвищення врожайності кормових культур (особливо на півночі), але з іншого боку, вона може негативно вплинути на якість кормів, яка значною мірою залежить від наявності води. Аналіз понад 21 000 зразків гною великої рогатої худоби, проведений для оцінки впливу клімату на вміст білка та енергії в кормах, показав, що корми з вищими температурами та меншою кількістю опадів у континентальних регіонах мають нижчий вміст білка та перетравлюваної органічної речовини.

Таким чином, крім прямого впливу теплового стресу, велика рогата худоба зазнає додаткових стресів при зміні кормової бази, особливо при підвищенні продуктивності. Це дослідження ще раз показує, що вплив на кількість і якість кормів може бути різним у різних регіонах і системах тваринництва. У результаті негативних наслідків глобального потепління молочні корови в умовах теплового стресу воліють споживати концентрати, а не грубі корми через метаболічне теплове навантаження, пов'язане з ферментацією грубих кормів. Однак надмірна кількість концентратів у раціоні може порушити фізіологію травлення жуйних тварин.

Тому варто зазначити, що високоякісні грубі та соковиті корми є основою раціону великої рогатої худоби. Це пов'язано з тим, що грубі корми не тільки задовольняють фізіологічні потреби та забезпечують нормальне здоров'я жуйних тварин, а й знижують вартість кормів, бо вони набагато дешевші за концентрати. При промисловому виробництві молока особлива увага приділяється заготівлі високоякісних грубих і соковитих кормів.

На півдні України та в інших регіонах зі шкідливим землекористуванням основу кормів для дійних корів на промислових фермах становить поєднання кукурудзяного силосу та люцернового сіна. Однак через часті посухи та незворотні зміни, пов'язані з глобальним потеплінням, вирощувати ці важливі

корми в достатній кількості та належної якості стає дедалі складніше. Тому пошук інноваційних підходів до виробництва кормів у південному регіоні є актуальним завданням на сьогоднішній день.

Однією з причин зниження виробництва кормів є гостра нестача кормозаготівельної техніки в сільському господарстві, як за кількістю, так і за масштабами. У результаті більша частина кормів заготовлюється з використанням традиційних методів і застарілої техніки.

Для збільшення виробництва і поліпшення якості кормів необхідне підвищення рівня механізації та впровадження сучасних технічних засобів, що забезпечують комплексну механізацію передових технологій у кормовиробництві. Аналіз конструкцій енергетичного обладнання та сільськогосподарської техніки провідних підприємств показує тенденцію до вдосконалення конструкцій, що забезпечують високоякісні, багатотехнологічні процеси з неухильним зростанням продуктивності праці. Це дало змогу підвищити продуктивність праці, знизити втрати врожаю, дотриматись екологічних вимог і поліпшити умови праці.

Останніми роками в зарубіжному кормовиробництві значного поширення набули гнучкі технології, що дають змогу домогтися високої ефективності заготівлі кормів за мінімізації втрат поживних речовин під час зберігання. Для реалізації таких технологій було розроблено технічне обладнання, що має високу продуктивність, високу якість виконання процесів, багатофункціональність і можливість автоматизації процесів.

1.2 Фізико-механічні властивості стеблових кормів

Фізико-механічні властивості стеблових кормів відіграють важливу роль у їхньому використанні, зберіганні та переробці. Ці властивості визначають, як корми поведуться під час транспортування, подрібнення, змішування та приготування кормових раціонів для тварин. Основні фізико-механічні

властивості, які слід враховувати при оцінці стеблових кормів, включають:

Щільність стеблових кормів впливає на їхню масу та об'єм, що важливо для визначення потреби у зберіганні та транспортуванні. Вона може змінюватися в залежності від вологості, типу рослин і методу їх обробки. Зазвичай, щільність скошених рослин нижча за щільність подрібнених кормів.

Вологість є критично важливим показником, оскільки впливає на зберігання кормів та їх поживну цінність. Висока вологість може призвести до гниття та втрати кормів, тоді як недостатня вологість зменшує їхні поживні властивості. Оптимальний рівень вологості для зберігання стеблових кормів зазвичай становить 15-20%.

Механічна міцність стеблових кормів важлива для забезпечення їх цілісності під час транспортування та зберігання. Ця властивість визначається здатністю кормів витримувати навантаження без руйнування. Вона залежить від структури рослин, їхнього віку та умов вирощування. Наприклад, молоді рослини зазвичай мають меншу міцність у порівнянні з дорослими.

Гнучкість та еластичність стеблових кормів впливають на їхню здатність до деформації під навантаженням. Ці властивості важливі для запобігання механічним ушкодженням під час обробки. Висока еластичність дозволяє кормам адаптуватися до зміни форми без їхнього руйнування.

Подрібнювальність стеблових кормів визначає їхню здатність до розподілу в кормових раціонах. Це показник, який описує легкість подрібнення кормів, і важливий для забезпечення оптимального розміру часток в раціоні тварин. Корм з високою подрібнювальністю легше змішувати з іншими компонентами.

Засвоюваність. Фізико-механічні властивості кормів також впливають на їхню засвоюваність. Корм, який легко подрібнюється і має оптимальну текстуру, зазвичай краще засвоюється тваринами. Це пов'язано з тим, що корм з великою часткою грубих волокон важче перетравлюється.

Коефіцієнти тертя стеблових кормів впливає на їхнє поводження під час

транспортування та зберігання. Низький коефіцієнт тертя забезпечує легкість переміщення кормів, тоді як високий коефіцієнт може спричинити ускладнення в процесах переробки.

Коефіцієнти стиснення відображають здатність кормів зменшувати об'єм під дією сили, що є важливим для їхнього зберігання у компактному вигляді.

Розуміння фізико-механічних властивостей стеблових кормів є важливим аспектом для ефективного їх використання в тваринництві. Це знання дозволяє агрономам і тваринникам оптимізувати процеси вирощування, збору, зберігання та обробки кормів, що в свою чергу забезпечує більш ефективне використання ресурсів та підвищення продуктивності тварин. В умовах змін клімату та зростання вимог до якості кормів, удосконалення фізико-механічних властивостей стеблових кормів стане ключовим завданням для агрономічних досліджень і практики.

Стеблові корми, які є пружно-в'язко-пластичним матеріалом, характеризуються волокнистою структурою та значною анізотропністю, тобто їх механічні, теплові, електричні, магнітні та оптичні властивості залежать від напрямку. Однією з ключових фізичних характеристик стеблових кормів є їхня щільність ($\text{кг}/\text{м}^3$), яка показує, скільки маси міститься в одиниці об'єму. Цей показник варіює залежно від вологості, ботанічного складу травосуміші та розміру частинок. Таблиця 1.1 ілюструє фізико-механічні властивості стебел.

Таблиця 1.1 – Деякі властивості стеблових кормів

Вид	Діаметр стебел на висоті зрізу, мм		Висота стебел, м		Питома робота різання, $\text{Дж}/\text{м}^2 \cdot 10^3$	
	min	max	min	max	min	max
Товсто-стеблові	15	50	1,0	5,0	5,9	23,6
Тонко-стеблові	5	10	0,5	3,0	5,9	23,6
Трави	2	15	0,3	0,8	3,9	21,6

Для ефективного визначення умов і режиму роботи кормодробарки необхідно знати її характеристики та умови навантаження, за яких відбувається дроблення. Вимоги до якості дроблення сировини визначаються її подальшим застосуванням. Середньозважений розмір часток після дроблення має становити 30-50 мм. Якщо корм використовується як підстилка, то середній розмір часток після дроблення має становити 80-100 мм.

1.3 Аналіз подрібнювачів стеблових кормів

Сьогодні на ринку сільськогосподарської техніки представлено широкий асортимент машин із різними технічними характеристиками. Тут аналізуються основні моделі вітчизняної та зарубіжної техніки, доступної для використання в малих фермерських господарствах, з акцентом на основні технічні параметри: продуктивність, потужність і питома витрата енергії.

Стаціонарні січкарні ІСС-180 (див. рис. 1.1) призначені для завантаження та подрібнення сухого рослинного матеріалу (сіна, соломи тощо) в циліндричні валки в стаціонарних умовах.

Стаціонарні подрібнювачі ІРК (див. рис. 1.1) можуть подрібнювати солому та сіно на різні фракції у вигляді тюків або рулонів.

Рулонний подрібнювач кормів ІРК-145 (див. рис. 1.1) призначений для переробки рулонного грубого корму або підстилкового матеріалу з подачею подрібнених шматків до годівниці або стійла. Робочий механізм складається з різального апарата з вісьмома ножами, який притискає рулон до обертового різального апарата і подрібнює його під власною вагою. Подрібнений рулон потрапляє на лопаті ротора і піднімається вгору до вивантажувального шланга.

Подрібнювач тюків ІР-1.8 (див. рис. 1.1) призначений для самозавантаження, транспортування і подрібнення тюків сіна, сінажу і соломи, при цьому подрібнена маса подається на тюк, кормовий стіл або підстилку.

Роторний кормоподрібнювач RIK-88 (див. рис. 1.1) призначений для перероблення грубих кормів вологістю до 20 і 60 % у розсипному і пресованому вигляді (тюки або рулони), при цьому подрібнена маса завантажується в транспортний засіб. Агрегати використовуються на фермах у всіх сферах тваринництва.

Навісний подрібнювач соломи ISN-1.8 (див. рис. 1.1) призначено для подрібнення та розкидання соломи на дрібніші частини для годівлі худоби або як підстилковий матеріал у стійловий період. Ротор із молотком і ситом дає змогу отримувати солому різних фракцій, забезпечуючи гігієнічні умови для худоби.

Кормоподрібнювач KR-02 (див. рис. 1.1) перемелює суху траву, сіно та солому з продуктивністю 400 кг/год і 120 кг/год. Матеріал подається вилами і забезпечений одним ситом, на якому виходить готова фракція 25-30 мм.

Січкаря NX (виробництво Туреччина) потужністю до 3 кВт призначена для подрібнення трави, сіна і соломи для виробництва корму для домашніх тварин і птиці в домашніх і невеликих фермерських господарствах (див. рис. 1.1).

Ефективність подрібнювачів оцінюється за такими технічними характеристиками, як продуктивність, питома витрата енергії та якість подрібнення.

Для отримання кінцевого подрібненого продукту машини використовують різні принципи руйнування, як-от стиснення, зрізання, удар і різання. Використання різних методів впливає на енергоспоживання процесу і фракційний склад готового продукту.

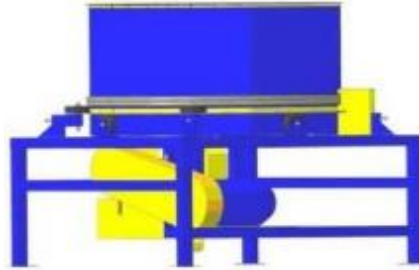
Вивчивши наявні технічні засоби для подачі, подрібнення та роздачі кормів тваринам і проаналізувавши запропоновані раніше системи класифікації, подрібнювачі можна розділити за різними критеріями (див. рис. 1.2).

За методом подачі корму: розрізняють подачу під дією гравітаційних сил (самопливом) та примусову подачу, яка здійснюється за допомогою механічних засобів, таких як транспортери чи повітряний потік вентилятора.

Робочий орган для подрібнення (ріжучий апарат) може бути розташований горизонтально, похило або вертикально, а конструкції ріжучого апарату можуть бути барабанними, дисковими, шнековими чи бітерними. Процес подрібнення може відбуватися через різні методи: плющення, дроблення ударом, розколювання, стирання або різання (нормальне, похиле, ковзне).



Подрібнювач соломи
ISS-180



Подрібнювач IRR-1M



Подрібнювач грубих
кормів IRK - 145



Подрібнювач ролонів
IR-1,8



Роторний подрібнювач
кормів RIK-88



Подрібнювач кормів
MS-16F



Кормоподрібнювач
KR-02



Соломорізка HX



Подрібнювач стеблин
DTZ PSE-2.6

Рисунок 1.1 – Подрібнювачі стеблових кормів

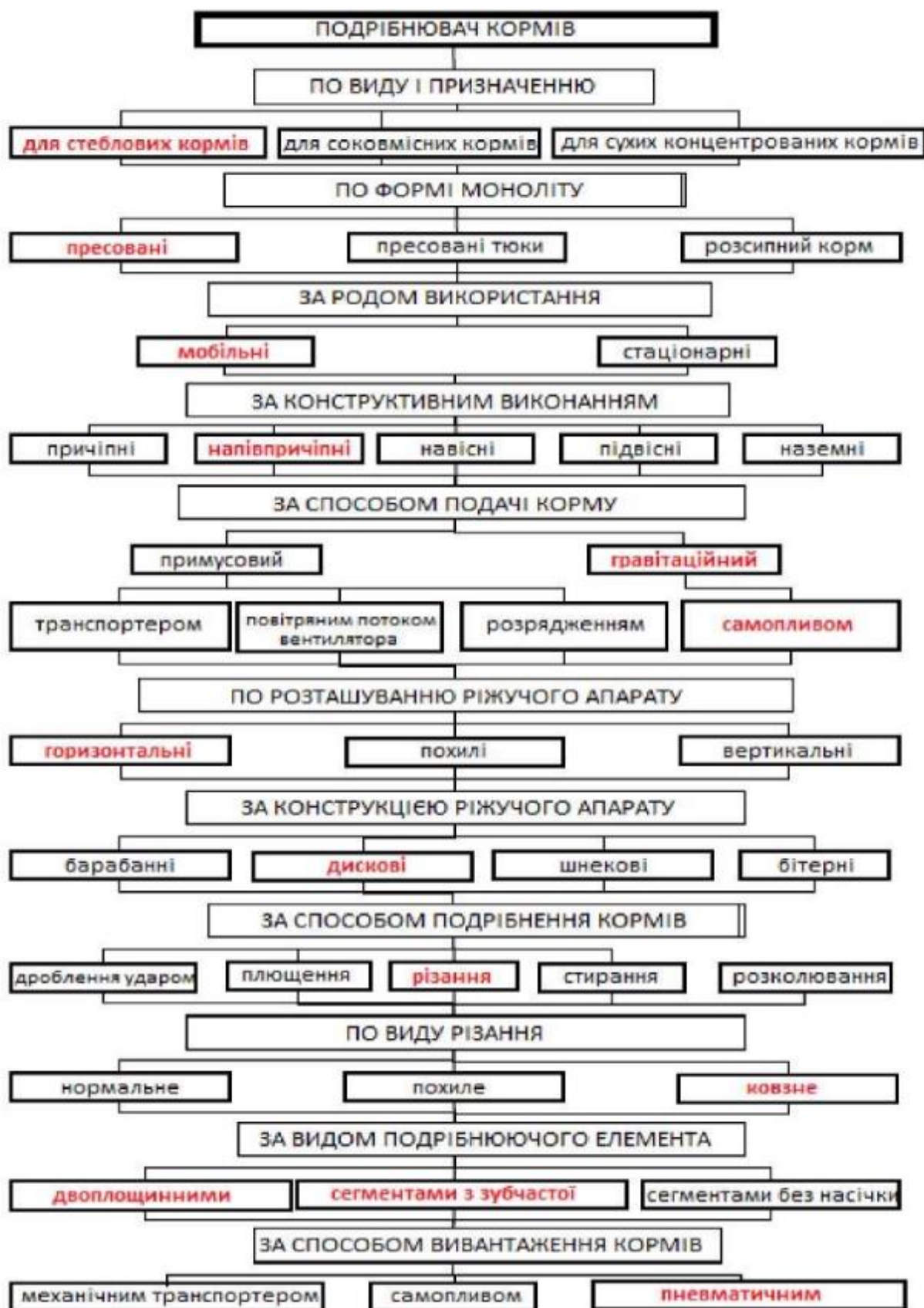


Рисунок 1.2 – Класифікація подрібнювачів кормів

За способом вивантаження подрібнювачі можна класифікувати на пневматичні, механічні та такі, що використовують самоплив. Існують також різні методи передачі крутного моменту, зокрема за допомогою електричного приводу, який є складовою електромеханічної системи, що перетворює електричну енергію на механічну та контролює цей процес, а також через вал відбору потужності, де трактор передає обертання від двигуна до механізмів. Найзручнішим є комбінування обох цих методів у технічному обладнанні.

Тому для зниження питомої витрати енергії та спрощення конструкції під час подрібнення пресового корму доцільно використовувати електропривод, що самопливом подає сировину на дисковий робочий орган із дугоподібними двоплощинними сегментами та горизонтальними зубчастими сегментами. Це дає змогу здійснювати ковзне різання в декількох площинах за пневматичної подачі сировини в кормороздавач.

1.4 Висновки з розділу

1. У останні роки в Україні спостерігається зниження темпів виробництва продукції тваринництва, що пов'язано із незадовільним станом кормової бази, зокрема низькою якістю та недостатньою кількістю кормів. Це призводить до реалізації генетичного потенціалу тварин лише на 40–90%. Оскільки корми складають до 70% собівартості тваринницької продукції, їх якість та доступність є критично важливими для підвищення продуктивності тварин та загальної ефективності галузі. В умовах зміни клімату і скорочення поголів'я дійних корів необхідно впроваджувати інноваційні агрономічні стратегії у виробництві кормів. Це дозволить забезпечити тварин всіма необхідними кормами та підвищити показники, такі як надої молока, фертильність корів і ріст молодняку. Для покращення виробництва кормів потрібне впровадження новітніх технічних

засобів і механізації, що підвищить продуктивність праці та зменшить втрати врожаю.

2. Фізико-механічні властивості стеблових кормів є критично важливими для їх використання, зберігання та переробки. Щільність, вологість, механічна міцність, гнучкість, подрібнювальність, засвоюваність, коефіцієнти тертя і стиснення — усі ці характеристики впливають на ефективність транспортування, обробки та приготування кормових раціонів. Розуміння цих властивостей дозволяє агрономам і тваринникам оптимізувати технологічні процеси, що підвищує продуктивність тварин та ефективність використання кормів. В умовах змін клімату та зростання вимог до якості кормів удосконалення фізико-механічних властивостей стеблових кормів є важливим завданням для агрономічних досліджень і практики.

3. Аналіз подрібнювачів стеблових кормів показує різноманіття технічних рішень, які забезпечують ефективне подрібнення, транспортування та роздачу кормів у сільському господарстві. Різні моделі машин, як вітчизняного, так і іноземного виробництва, характеризуються різними технічними параметрами, такими як продуктивність, потужність та енергоємність, що дозволяє агрономам і тваринникам вибирати оптимальні рішення для малих форм господарювання. Використання різних принципів руйнування та методів подачі корму впливає на якість подрібнення та енергоефективність процесу. Подальші вдосконалення технологій, зокрема впровадження електроприводу і гравітаційної подачі сировини, можуть знизити енергоємність і поліпшити функціональність обладнання для обробки стеблових кормів.

2 АНАЛІТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ПОДРІБНЕННЯ СТЕБЛОВИХ КОРІВ

2.1 Конструктивно-технологічна схема

У цьому дослідженні використовувалася молоткова дробарка CPS-420, яка широко використовується малими фермами, як тестовий прототип, що зображено на рисунку 2.1. Дробарка головним чином складається з двигуна, верхнього і нижнього завантажувальних бункерів, ножа для соломи, молотка, сита, рами, виходу та інших частин.

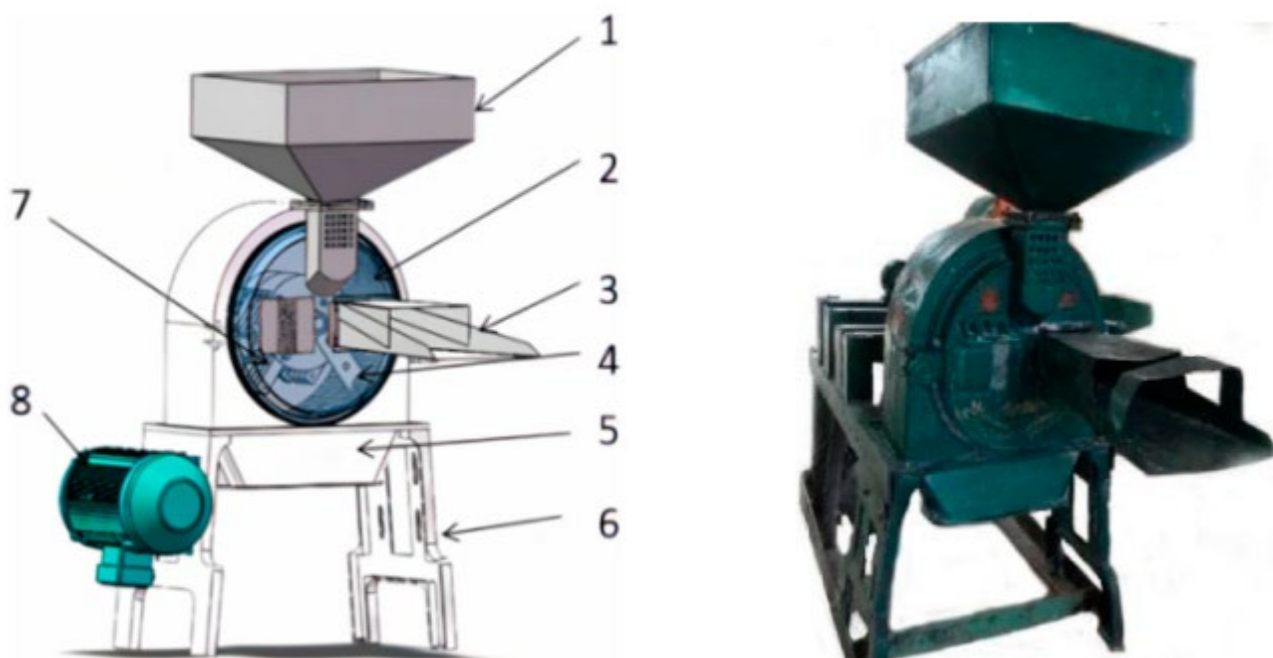


Рисунок 2.1 – Тривимірна модель та зразкова машина молоткової дробарки:
1 – верхній завантажувальний бункер; 2 – сито; 3 – нижній завантажувальний бункер; 4 – ніж для соломи; 5 – вихід; 6 – рама; 7 – молоток; 8 – двигун.

Коли дробарка працює, матеріали подаються в камеру подрібнення через завантажувальний бункер. Високошвидкісні обертові молотки захоплюють

матеріали в зону прискорення та виконують кругові рухи разом із молотками в камері подрібнення. Молотки ламають матеріали, і під дією ударної сили та повітряного потоку вони потрапляють на сито. Після удару та тертя об сито вони додатково подрібнюються на дрібні частинки. Під дією відцентрової сили та повітряного потоку дрібні частинки матеріалу, розмір яких менший за діаметр отворів сита, проходять через них і виводяться через випускний отвір. Великі частинки матеріалу відскакують після удару об сито та знову піддаються удару молотками. Процес повторюється, поки всі частинки матеріалу в камері подрібнення не будуть виведені з машини. Основні параметри дробарки наведені в таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 – Основні технічні параметри молоткової дробарки CPS-420

Параметр	Значення
Розмір (довжина × ширина × висота)	850 мм × 800 мм × 1300 мм
Діаметр камери подрібнення	420 мм
Ширина камери подрібнення	180 мм
Діаметр ротора	340 мм
Потужність двигуна	3 кВт
Кількість молотків	16–24
Продуктивність машини	600–1000 кг/год

2.2 Аналіз сил, що діють на соломі в камері подрібнення

У цьому дослідженні процес подрібнення кукурудзяної соломи було зафіксовано за допомогою високошвидкісної зйомки, як показано на рисунку 2.2. На рисунку видно, що молотки вдаряли кукурудзяну соломі під час процесу подрібнення, і відбувався відносний рух між молотками та ситом, яке зазнавало

сил стискання та тертя під їх спільною дією. Кукурудзяна солома додатково подрібнювалася під дією сил стискання та розриву.

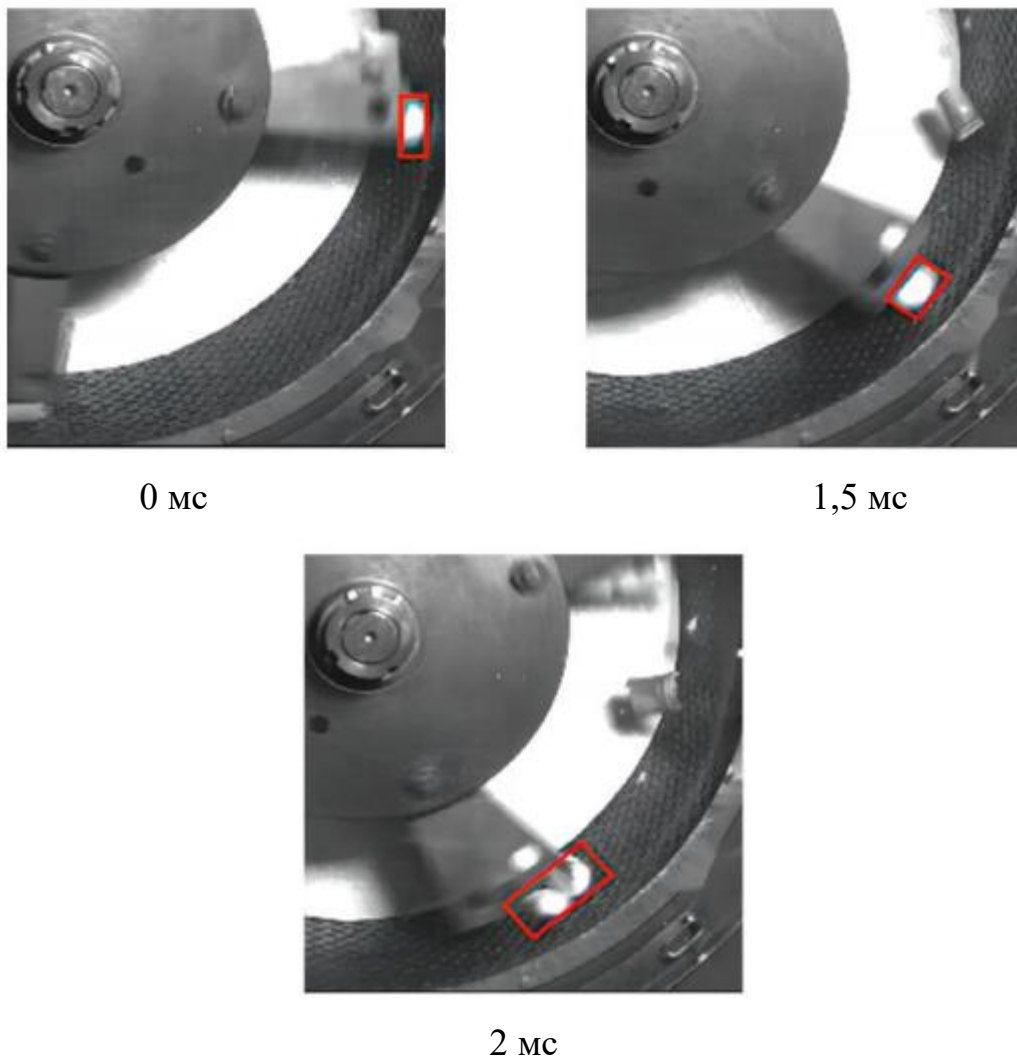


Рисунок 2.2 – Процес подрібнення кукурудзяної соломи (місце та подрібнення соломи, позначене червоним квадратом)

Схема аналізу сил, що діють на кукурудзяну солому, показана на рисунку 2.3. Згідно із законом збереження імпульсу, можна отримати наступне рівняння:

$$Mv = Mv_1 + mv_2 \quad (2.1)$$

$$\begin{cases} v = \frac{\pi n_1 D}{60} \\ v_1 = \frac{\pi n_2 D}{60} \end{cases} \quad (2.2)$$

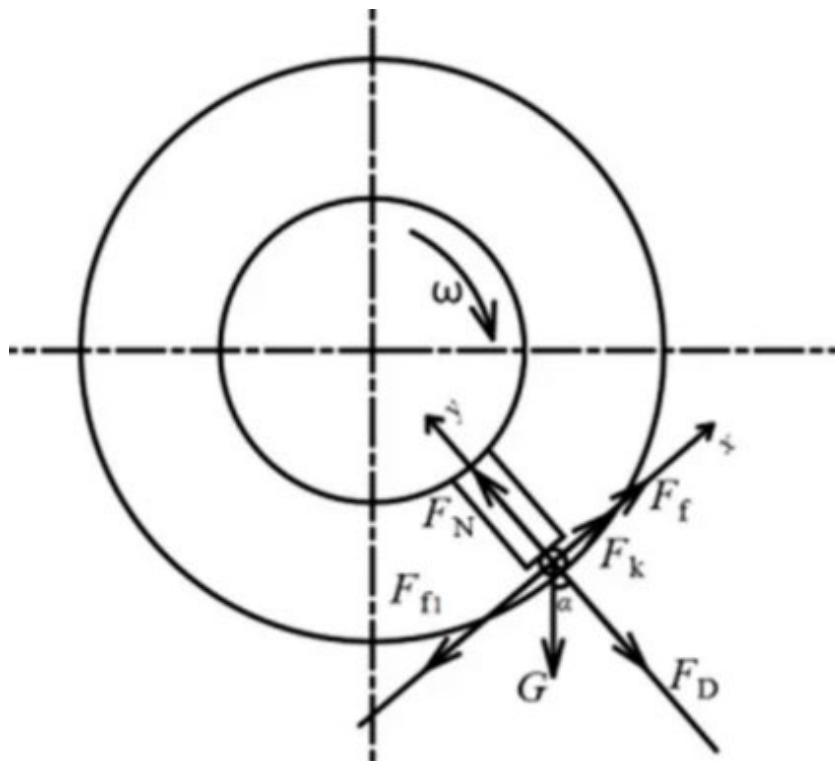


Рисунок 2.3 – Схема аналізу напружень кукурудзяної соломи

Можна отримати формулу (2.3):

$$v_2 = \frac{\pi M D (n_1 - n_2)}{60 m} \quad (2.3)$$

де M — маса молотка (кг); m — маса одиниці кукурудзяної соломи (кг); v — лінійна швидкість молотка (м/с); v_1 — швидкість молотка після удару по кукурудзяній соломі (м/с); v_2 — швидкість кукурудзяної соломи після удару (м/с); n_1 — швидкість молотка перед ударом по кукурудзяній соломі (об/хв); n_2 — швидкість обертання молотка після удару по кукурудзяній соломі (об/хв).

Згідно з принципом Д'Аламбера, рівняння рівноваги сил тертя кукурудзяної соломи встановлюється таким чином:

$$\begin{cases} \sum F_x = 0 & G \sin \alpha + F_{f1} - F_k - F_f = 0 \\ \sum F_y = 0 & F_D + G \cos \alpha - F_{ic} = 0 \end{cases} \quad (2.4)$$

$$\begin{cases} F_f = \mu F_D \\ F_{f1} = \mu m \frac{v^2}{D+\delta} = \mu \frac{m^2 \pi^2 D^2 (n_1 - n_2)^2}{3600(D+\delta)} \\ F_{ic} = 2m\omega v_r \\ F_k = \frac{1}{2} C \rho S v_{r2} \end{cases} \quad (2.5)$$

Можна отримати Формулу (2.6):

$$F_D = \mu \frac{M^2 \pi^2 D^2 (n_1 - n_2)^2}{3600m(D + \delta)} \quad (2.6)$$

де G — вага кукурудзяної соломи (Н); F_D — сила тертя одиниці кукурудзяної соломи (Н); F_f — сила тертя молотка по кукурудзяній соломі (Н); F_{f1} — сила тертя сита по кукурудзяній соломі (Н); F_k — опір повітря (Н); F_{ic} — сила інерції Коріоліса (Н); D — зовнішній діаметр ротора (м); μ — коефіцієнт тертя кукурудзяної соломи з ситом і молотком; δ — зазор між молотком і ситом (м); C — коефіцієнт опору повітря; ρ — густина повітря (кг/м³); S — площа, на яку діє вітер, у кукурудзяній соломі (м²); v_{r2} — відносна швидкість соломи та повітря (м/с).

2.3 Аналіз руху соломи під час процесу подрібнення

Аналіз руху одиниці кукурудзяної соломи було виконано з припущенням, що одиниця соломи є часткою з масою m , а схема аналізу руху показана на рисунку 2.4.

$$\vec{u}_m = \vec{u}_e + \vec{u}_r \quad (2.7)$$

$$u_e = \omega_1 L \quad (2.8)$$

Можна отримати формулу (2.9):

$$u_m = \frac{\omega_1 L}{\cos \gamma_1} \quad (2.9)$$

де u_m — абсолютна швидкість кукурудзяної соломи (м/с); u_e — залучена швидкість кукурудзяної соломи (м/с); u_r — відносна швидкість одиниці соломи уздовж молотка (м/с); ω_1 — кутова швидкість ротора, а r_2 — відстань від одиниці кукурудзяної соломи до центру ротора (м).

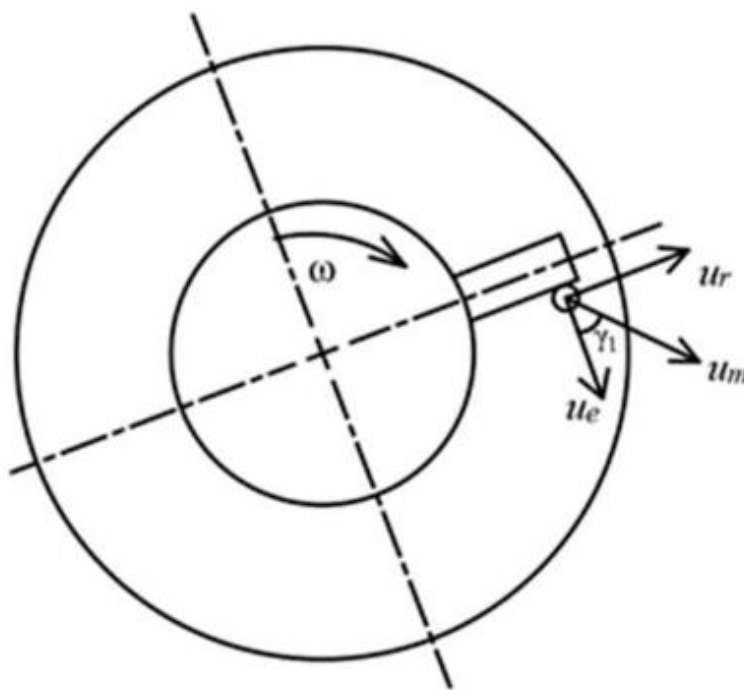


Рисунок 2.4 – Схема аналізу руху одиниці кукурудзяної соломи

Аналіз сил, що діють на одиницю кукурудзяної соломи під час удару, показаний на рисунку 2.5. Згідно з другим законом Ньютона, отримуємо:

$$ma = \sum F = G_1 + F_{f2} + F_{ic1} + F_{k1} \quad (2.10)$$

де G_1 — вага кукурудзяної соломи (Н); F_{f2} — сила тертя молотка по кукурудзяній соломі (Н); F_{ic1} — сила інерції Кориоліса (Н); F_{k1} — опір повітря (Н).

У напрямку x :

$$ma = F_{L1} \cdot \cos \gamma_2 - G_1 \cdot \sin \gamma_4 - F_{f2} - F_{k1} \cdot \sin \gamma_3 \quad (2.11)$$

У напрямку y :

$$0 = N + G_1 \cdot \cos \gamma_4 - F_{ic1} - F_{k1} \cdot \cos \gamma_3 - F_{L1} \cdot \cos \gamma_2 \quad (2.12)$$

$$\begin{cases} G_1 = mg \\ F_{f2} = \mu N \\ F_{ic1} = 2m\omega_1 u_r \\ F_{k1} = \frac{1}{2} C_1 \rho_1 S_1 u_m \end{cases} \quad (2.13)$$

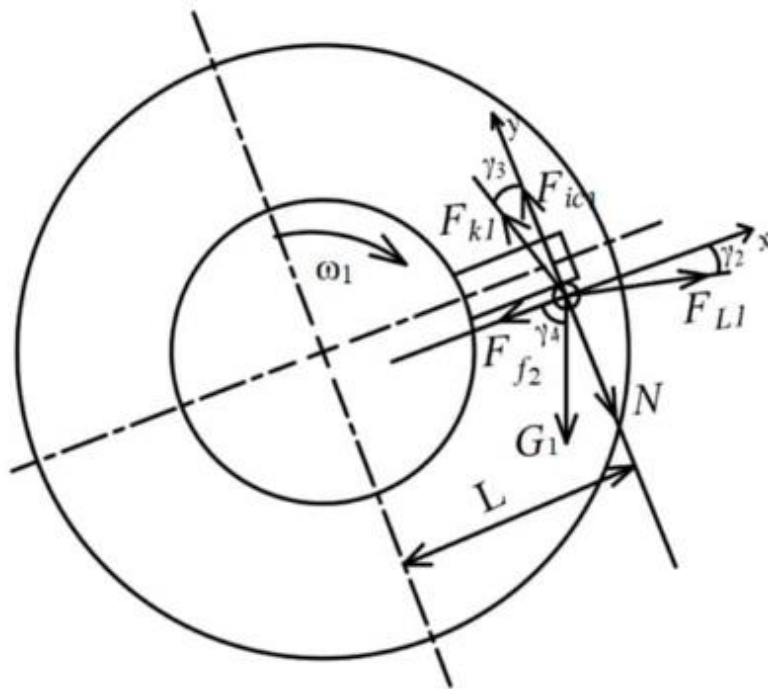


Рисунок 2.5 – Схема аналізу сил, що діють на одиницю кукурудзяної соломи

Диференціальне рівняння руху матеріалів уздовж молотка можна отримати з формули (2.14):

$$m \frac{d_{ur}}{dt} = m\omega_1^2 L \cdot \cos \gamma_2 - mg \cdot \sin \gamma_4 - \mu N - \frac{\omega_1 L}{2 \cos \gamma_1} C_1 \rho_1 S_1 \cdot \sin \gamma_3 \quad (2.14)$$

Диференційне рівняння руху матеріалів уздовж молотка можна отримати з формули (2.15):

$$0 = N + mg \cdot \cos \gamma_4 - 2m\omega_1 u_r - \frac{\omega_1 L}{2 \cos \gamma_1} C_1 \rho_1 S_1 \cdot \cos \gamma_3 - m\omega_1^2 L \cdot \cos \gamma_2 \quad (2.15)$$

Можна отримати формулу (2.16):

$$\begin{aligned} \frac{d_{ur}}{dt} = & g (\mu \cos \gamma_4 - \sin \gamma_4) + \omega_1^2 L (\sin \gamma_2 + \cos \gamma_2) - \\ & - 2\mu\omega_1 u_r - \frac{\omega_1 L}{2 \cos \gamma_1} C_1 \rho_1 S_1 (\cos \gamma_3 - \sin \gamma_3) \end{aligned} \quad (2.16)$$

З наведеного теоретичного аналізу випливає, що сили, які діють на кукурудзяну соломку, головним чином залежать від швидкості обертання шпинделя, лінійної швидкості кінця молотка, зовнішнього діаметра ротора та зазору між молотком і ситом. У цьому дослідженні швидкість обертання шпинделя та зазор між молотком і ситом були вибрані як експериментальні фактори для подальшого числового моделювання та фізичних тестів.

2.5 Висновки з розділу

1. Під час подрібнення кукурудзяної соломи в молотковій дробарці відбувається складний процес взаємодії молотків, сита та матеріалу. Молотки, що обертаються на високій швидкості, завдають ударів по соломі, викликаючи її руйнування під впливом сил стискання та тертя. Ці сили діють спільно, забезпечуючи додаткове подрібнення соломи. Стирання та удари між молотками і ситом призводять до багаторазового руйнування часток, доки вони не стануть достатньо малими для проходження через отвори сита. Аналітичні розрахунки показали, що на ефективність подрібнення впливають такі фактори, як маса та

швидкість молотка, розміри ротора, зазор між молотком і ситом, а також опір повітря.

2. Аналіз руху кукурудзяної соломи під час процесу подрібнення показав, що її рух та подрібнення значною мірою залежать від швидкості обертання шпинделя, лінійної швидкості кінців молотків, зовнішнього діаметра ротора та зазору між молотком і ситом. Ці параметри впливають на ефективність подрібнення, визначаючи силу тертя та інерції, які діють на солону. Для подальшого вдосконалення процесу подрібнення були обрані швидкість обертання шпинделя та зазор між молотком і ситом як основні фактори для числового моделювання та експериментальних досліджень.

3 МЕТОДИКА ЧИСЕЛЬНОГО МОДЕЛЮВАННЯ І ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ПРОЦЕСУ ПОДРІБНЕННЯ СТЕБЛОВИХ КОРМІВ

3.1 Створення сітки молоткової дробарки

Чисельну модель молоткової дробарки було створено за допомогою програмного забезпечення Simcenter Star-CCM+, при цьому розміри моделі відповідали реальним розмірам. Для покращення якості сітки у подальшій області обчислення рідини та зменшення кількості обчислень модель потрібно було спростити, і спрощена модель молоткової дробарки показана на рисунку 3.1. Об'єднана модель ротора дробарки була збережена у форматі файлу *.prt для формування незалежної частини. Операція булевого віднімання в програмі Simcenter Star-CCM+була використана для вилучення об'єднаних частин ротора всередині камери подрібнення, щоб отримати 3D-модель області рідини камери подрібнення.

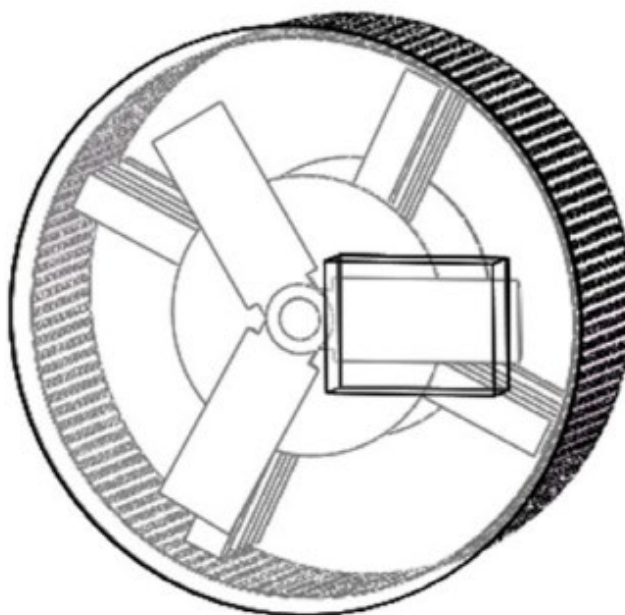


Рисунок 3.1 – Спрощена модель

3D-модель області рідини камери подрібнення, отвір для подачі та сито були збережені у форматі файлів Parasolid і імпортовані в Simcenter Star-CCM+ для створення сітки. Інтерфейси було налаштовано на контактних поверхнях кожної частини для передачі інформації. Тип сітки було вибрано як Tetra/Mixed, а метод генерації сітки — Robust (Octree). Сітки кожної частини були об'єднані, результати сіткового розбиття були розраховані, і в цілому було створено 5 051 110 сіткових елементів, як показано на рисунку 3.2.

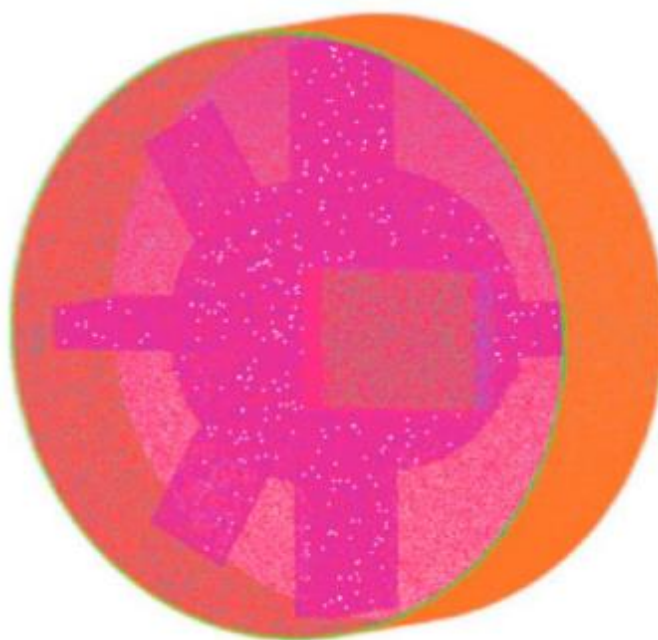


Рисунок 3.2 – Розбиття на сітки

3.2 Створення чисельної моделі кукурудзяної соломи

Модель кукурудзяної соломи була створена за допомогою програмного забезпечення Simcenter Star-CCM+, і всередину були заповнені три види часток, які представляли зовнішню оболонку, внутрішню м'якоть і вузол кукурудзяної соломи. Як модель механіки контакту часток був обраний модель Герца-Міндліна

з урахуванням зчеплення, відповідно до попередніх досліджень групи. Параметри моделі були встановлені, як показано в таблиці 3.1. Чисельна модель кукурудзяної соломи та схематична діаграма зчеплень показані на рисунках 3.3 і 3.4. Координати позицій трьох часток були визначені окремо для подальшої заміни часток за допомогою API.



Рисунок 3.3 – Чисельна модель кукурудзяної соломи: 1 – частки внутрішньої м'якоті; 2 – частки вузла; 3 – частки зовнішньої оболонки

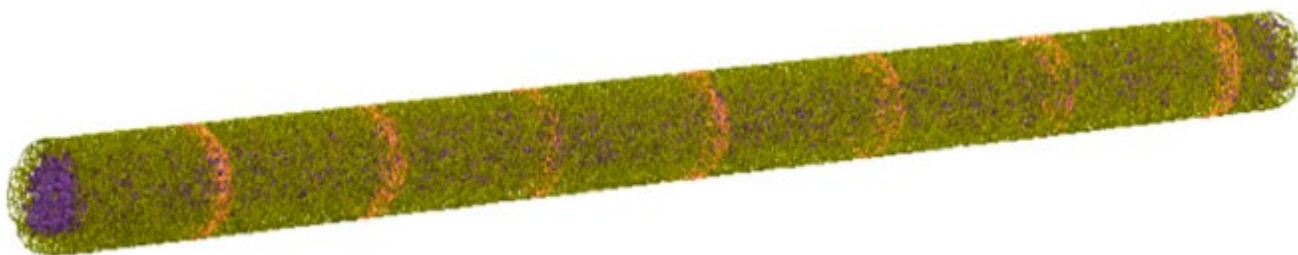


Рисунок 3.4 – Схема зчеплень

У цьому дослідженні було використано 101 частку у вигляді одиночної сфери з радіусом 10 мм для створення моделі великих часток кукурудзяної соломи. Файл сітки спрощеної моделі молоткової дробарки був імпортований у програму Simcenter Star-CCM+, модель контакту між частками було встановлено як модель Герца-Міндліна із зчепленням, а модель контакту між частками та

геометрією була налаштована як модель Герца-Міндліна (без ковзання). Чотири шляхи файлів моделі контакту, сил часток, часток і заводу були замінені на три API-програмні файли зовнішньої оболонки, внутрішньої м'якоті та вузла для завершення заміни часток, як показано на рисунку 3.5.

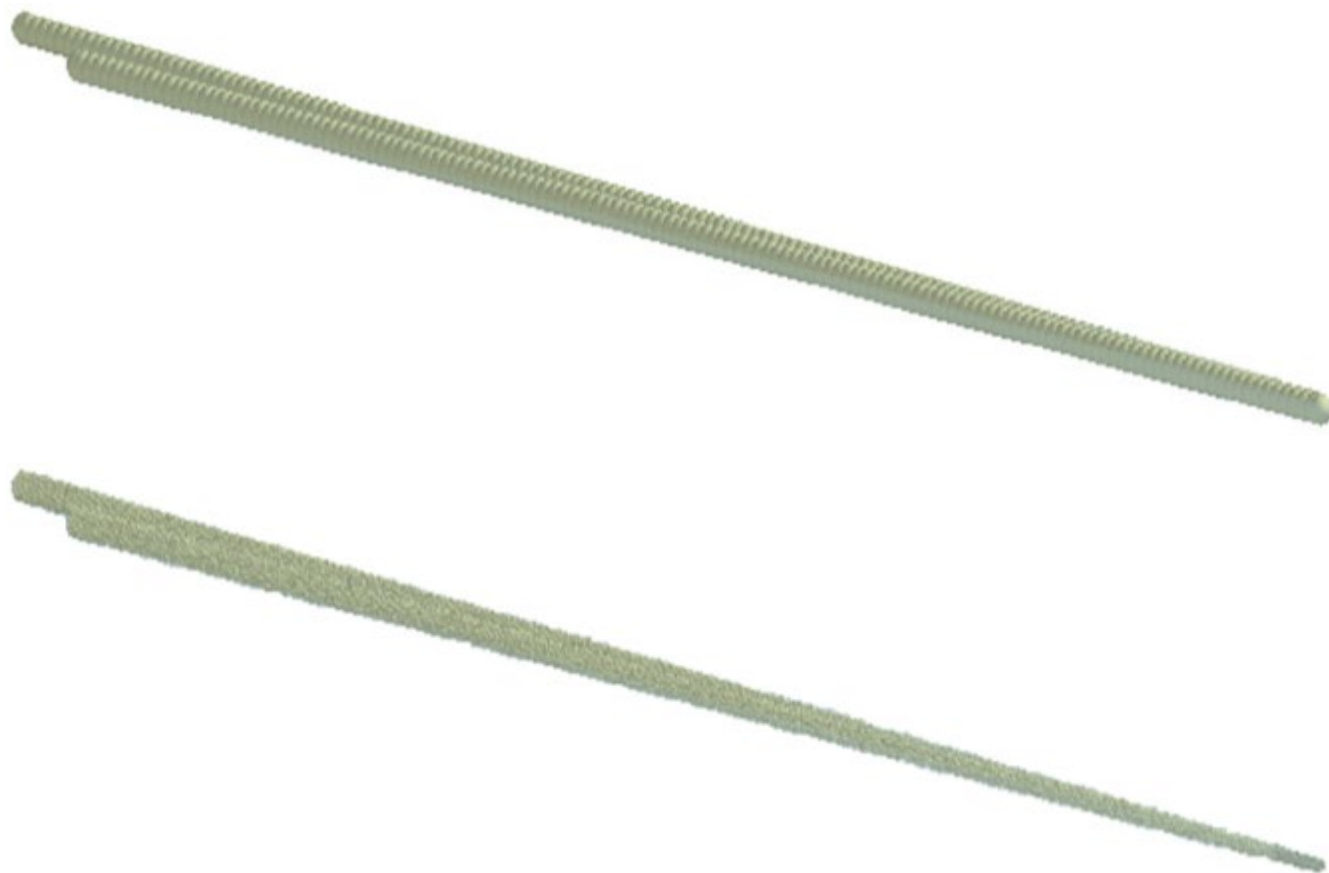


Рисунок 3.5 – Заміна часток

Таблиця 3.1 – Налаштування параметрів моделі Герца-Міндліна із зчепленням

Параметр	Нормальна жорсткість (Н/м ³)	Зсувна жорсткість (Н/м ³)	Критичне нормальне напруження (Па)	Критичне зсувне напруження (Па)
Зовнішня оболонка– зовнішня оболонка	5.5×10^9	5.2×10^8	1.22×10^8	7.89×10^6

Параметр	Нормальна жорсткість (Н/м ³)	Зсувна жорсткість (Н/м ³)	Критичне нормальне напруження (Па)	Критичне зсувне напруження (Па)
Внутрішня м'якоть– внутрішня м'якоть	5.05×10^8	5×10^7	1.4×10^6	3.9×10^5
Вузол–вузол	5.23×10^8	4.89×10^7	1.35×10^6	3.88×10^5
Зовнішня оболонка– внутрішня м'якоть	5.05×10^8	5×10^7	1.4×10^6	3.9×10^5
Зовнішня оболонка– вузол	5.21×10^8	5.02×10^7	1.39×10^6	3.68×10^5
Внутрішня м'якоть– вузол	5.05×10^8	5×10^7	1.4×10^6	3.9×10^5

3.3 Налаштування параметрів

Програмне забезпечення Simcenter Star-CCM+ було використано для читання файлу сітки, створеного в ICEM. Для числових симуляцій було обрано розв'язувач стаціонарного тиску, стандартну модель k-ε для обчислювальної моделі, а матеріалом було визначено повітря. Вхід для подачі визначено як вхід зі швидкістю, сітка визначена як нерухома стіна, частини ротора визначені як рухома стіна з доданою швидкістю, а зовнішня поверхня сітки визначена як вихід тиску. Для методу розв'язання було обрано SIMPLE, а формат PRESTO! обрано для градієнта тиску. Умови меж було встановлено, як показано в таблиці 3.2.

Для забезпечення ефективності чисельного моделювання та підтримання стабільності з'єднання було необхідно встановити кроки часу обох програм і інтервал зберігання даних як цілі кратні. Конкретні налаштування показано в таблиці 3.3.

Таблиця 3.2 Налаштування меж умов

Умова межі	Значення
Вхідна швидкість	10 м/с
Інтенсивність турбулентності на вході	5%
Гідравлічний діаметр на вході	108 мм
Інтенсивність турбулентності на виході	5%
Гідравлічний діаметр на виході	200 мм
Вихідний тиск	0 Па

Таблиця 3.3 – Взаємозв'язок кроку часу Simcenter Star-CCM+–FLUENT

Програмне забезпечення	Часовий крок (с)	Час зберігання даних (с)
Simcenter Star-CCM+	1.2×10^{-6}	0.01
FLUENT 17.0	1.2×10^{-4}	0.1

3.4 Оцінка продуктивності подрібнювача

Для точної оцінки продуктивності подрібнення молоткової дробарки було використано стандарт: GB/T6971-2007. У цьому дослідженні як показники оцінки продуктивності подрібнення соломи використано виробництво на кВт·год та прохідність подрібнення.

Питомі енерговитрати молоткової дробарки (кВт·год):

$$Z = \frac{Q_c}{Z_c} \quad (3.1)$$

де Z — виробництво на кВт·год; Q_c — маса подрібненої соломи (кг); Z_c — споживання енергії під час роботи дробарки, (кВт·год).

Прохідність подрібнення S :

$$S = \frac{z_1}{z_2} \times 100\% \quad (3.2)$$

де S — прохідність подрібнення, (%); z_1 — якість підходящої кукурудзяної соломи в зразку, (кг); z_2 — якість зразка, (кг).

Тестування виконували в три етапи: регулювання частотного перетворювача для налаштування швидкості шпинделя, робота з комп'ютером, а також використовували програмне забезпечення для збору та управління даними M400 для запису даних про момент обертання, швидкість і потужність, які зберігалися на жорсткому диску комп'ютера. Подавали кукурудзяну солому в камеру подрібнення відповідно до номера тесту та отримували зразок на вихідному отворі. Після кожного тесту було взято 100 г зразка, який зберігався в герметичному пакеті. Одночасно номер тесту позначався на герметичному пакеті для подальшого розрахунку виходу електроенергії та прохідності подрібнення.

Тестові матеріали обрано з природно висушеної на повітрі кукурудзяної соломи після збору врожаю. Вологість соломи дорівнювала 8,83%. Інструменти, використані в експерименті: тахометр, частотний перетворювач, датчик крутного моменту, електронні ваги з точністю 0,01 кг, електронний секундомір і стандартне сито.

3.5 Висновок з розділу

1. Проведено створення чисельних моделей молоткової дробарки та кукурудзяної соломи з використанням програмного забезпечення Simcenter Star-CCM+. Модель молоткової дробарки була спрощена для підвищення якості сітки, що дозволило зменшити кількість обчислень. В результаті було створено 5 051 110 сіткових елементів, що забезпечило точність подальших симуляцій.

2. Розроблена модель кукурудзяної соломи, що включала три типи часток, які імітували її структуру. Для моделювання механіки контактів

використано модель Герца-Міндліна з урахуванням зчеплення, що відобразило реальні фізичні властивості часток.

3. Налаштування параметрів симуляції, зокрема умов меж і зв'язків між програмами, забезпечили стабільність і ефективність обчислень. Оцінка продуктивності молоткової дробарки базувалася на національному стандарті GB/T6971-2007 і передбачала розрахунок виробництва на кВт·год та прохідності подрібнення.

4 РЕЗУЛЬТАТИ ЧИСЕЛЬНОГО МОДЕЛЮВАННЯ І ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ПРОЦЕСУ ПОДРІБНЕННЯ СТЕБЛОВИХ КОРМІВ

4.1 Результати чисельного моделювання

На рисунку 4.1 показано діаграму швидкості потоку в камері подрібнення при різних швидкостях шпинделя. З графіка видно, що від шпинделя до кінця молотка швидкість розподіляється градієнтно та є більш рівномірною. Зі збільшенням швидкості шпинделя швидкість потоку в кінці молотка демонструє зростаючу тенденцію. При цьому мінімальна швидкість потоку в районі шпинделя наближається до 0 м/с, а швидкість потоку в кінці молотка є максимальною. Занадто висока швидкість потоку збільшує швидкість переміщення кукурудзяної соломи, що, в свою чергу, зменшує кількість ударів по подачі, впливаючи на ефективність подрібнення. Таким чином, відповідна швидкість потоку сприяє підвищенню ефективності подрібнення соломи та її врожайності.

На рисунку 4.2 представлено тискове поле в камері подрібнення при різних швидкостях шпинделя. З графіка видно, що тиск розподіляється градієнтно та є більш рівномірним від шпинделя до сита. Зі збільшенням швидкості шпинделя тиск в потоку всередині камери подрібнення демонструє зростаючу тенденцію. При цьому тиск в районі шпинделя є найменшим, а тиск біля сита — найбільшим. Чим більший тиск сита, тим легше кукурудзяна солома виходить із сита, а відповідний тиск в потоці сприяє покращенню виходу матеріалу з сита.

Ступінь руйнування з'єднуючого елемента, що використовується для зв'язку дискретних елементів моделі кукурудзяної соломи, може імітувати природний ефект подрібнення. Тому для чисельного моделювання процесу подрібнення кукурудзяної соломи були проаналізовані характеристики руйнування зв'язків. Коли швидкість шпинделя становила 2000 об/хв, 2500 об/хв та 3000 об/хв

відповідно, вивчені результати кількості зламаних зв'язків зовнішньої оболонки, внутрішньої м'якоті та вузла в залежності від швидкості шпинделя, що показано на рисунку 4.3. З діаграми видно, що зі збільшенням часу та швидкості шпинделя швидкість руйнування зв'язків між зовнішньою оболонкою, внутрішньою м'якоттю та частками вузла прискорюється, що підвищує ефективність подрібнення.

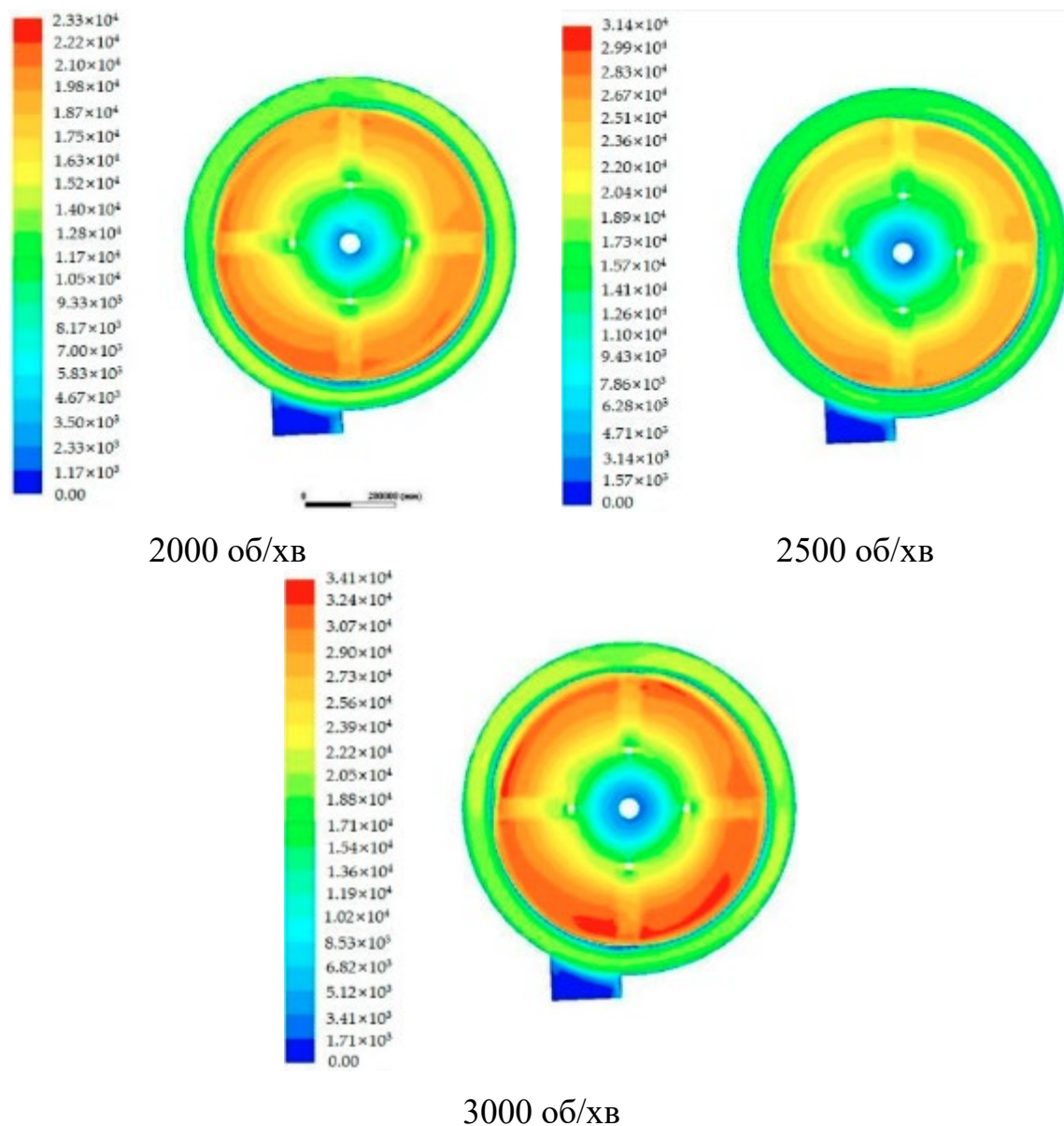


Рисунок 4.1 – Зміна швидкості в потоці всередині камери подрібнення при різних швидкостях шпинделя

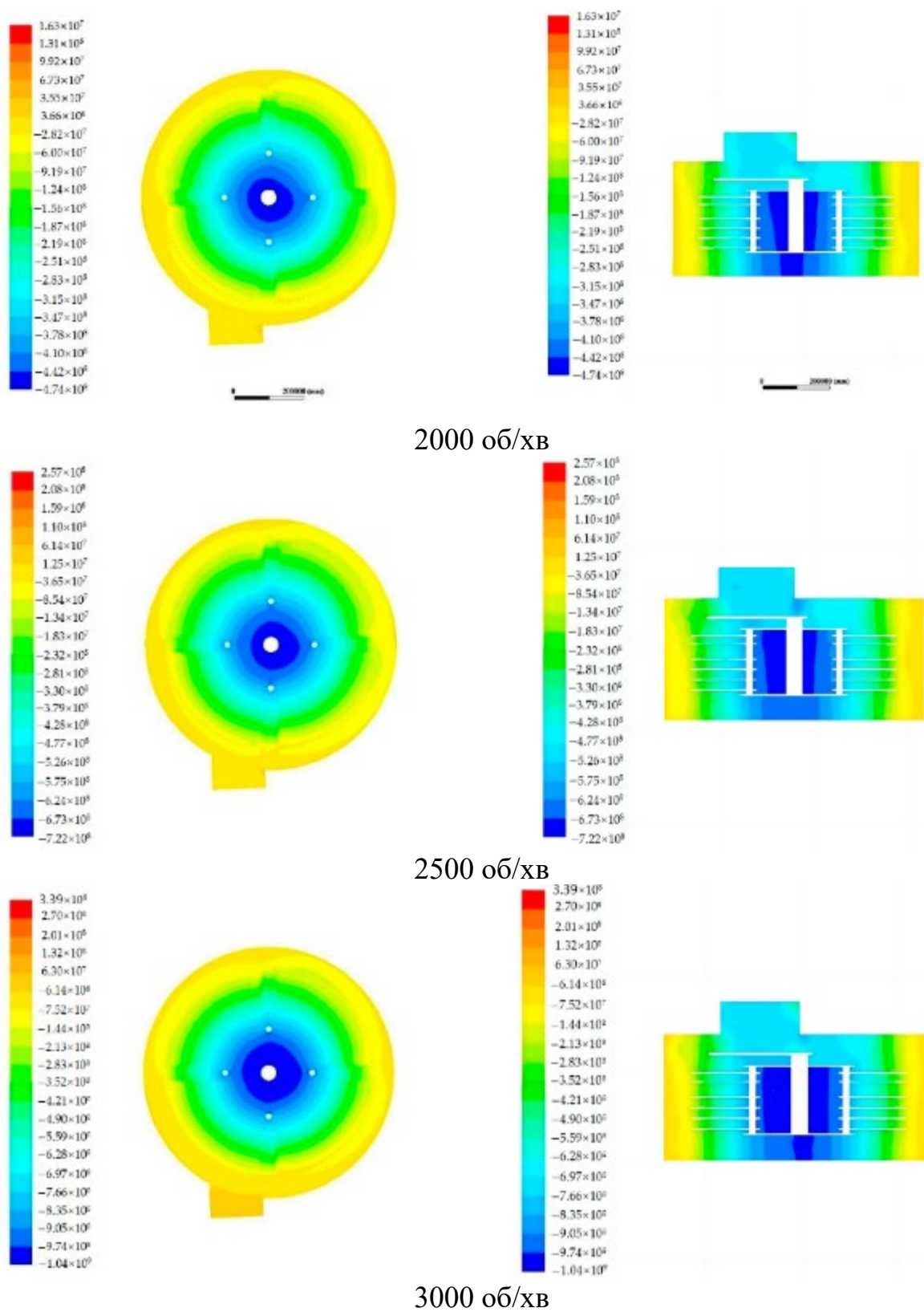
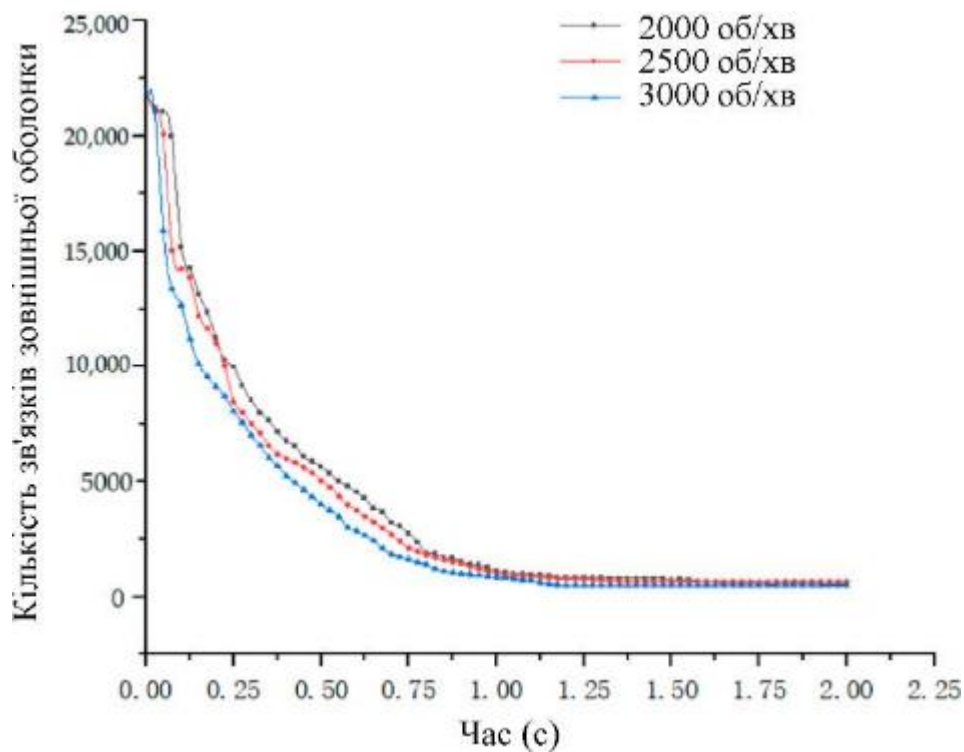
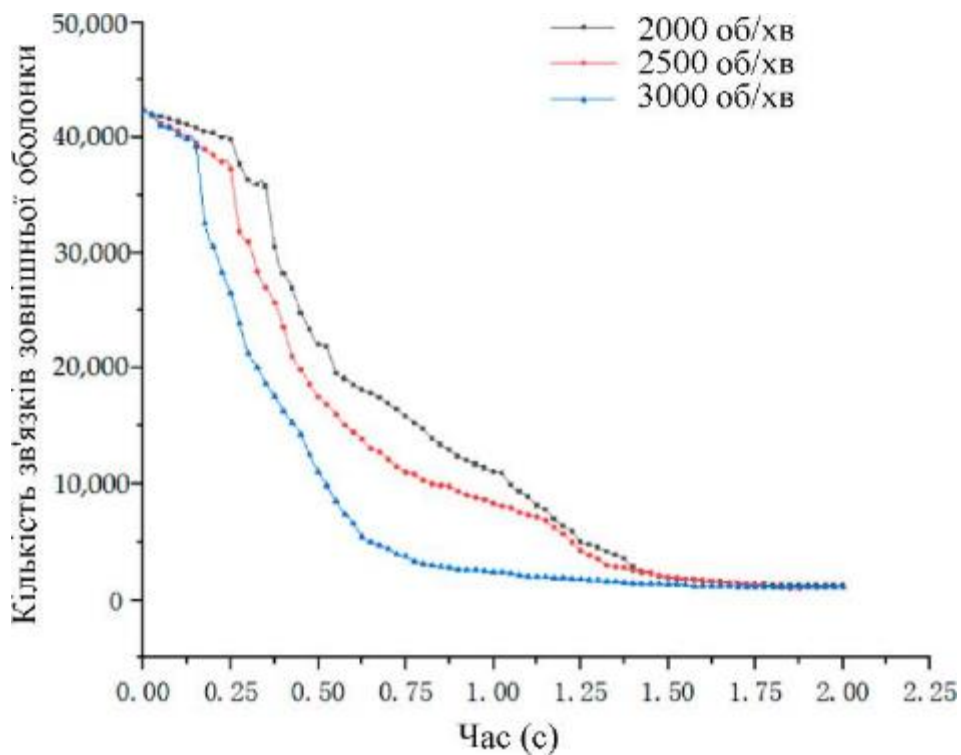


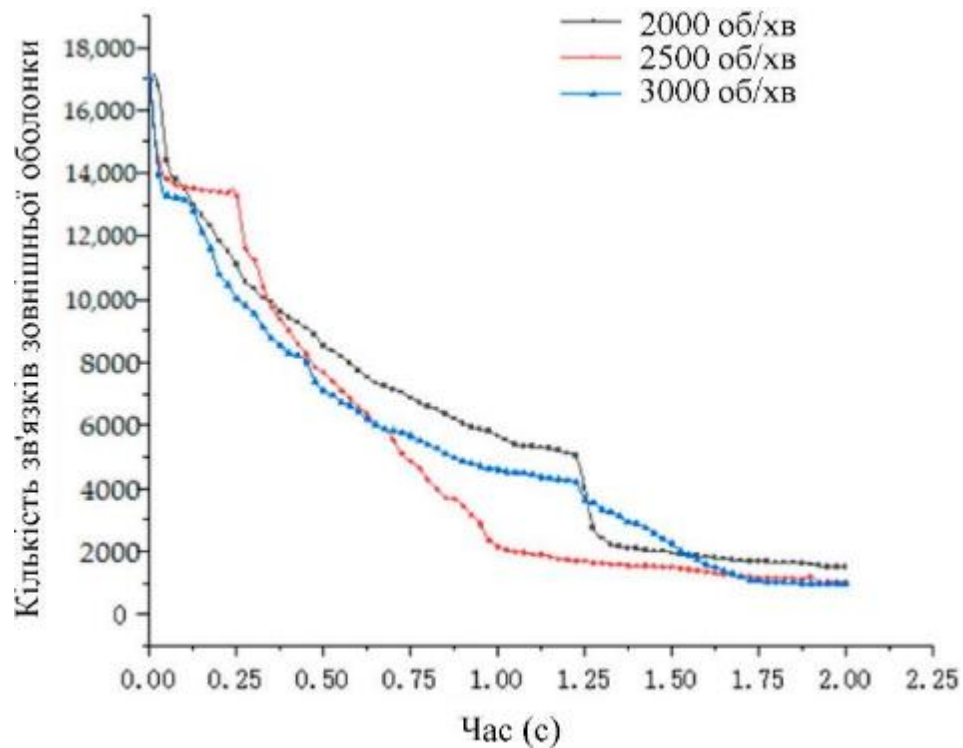
Рисунок 4.2 – Зміна тискового поля всередині камери подрібнення при різних швидкостях шпинделя



Результати чисельного моделювання зміни зв'язків зовнішньої оболонки зі швидкістю шпинделя



Результати чисельного моделювання зміни зв'язків внутрішньої пульпи зі швидкістю шпинделя



Результати чисельного моделювання зміни вузлових зв'язків зі швидкістю шпинделя

Рисунок 4.3 – Зміна тискового поля всередині камери подрібнення при різних швидкостях шпинделя

Результати симуляцій стосовно втрат енергії компонентів молотка були проаналізовані за допомогою частини постобробки, щоб отримати результати загальних втрат енергії в процесі зіткнення між компонентами молотка та кукурудзяною соломою. У цьому дослідженні було виділено 100 точок даних із 1-секундного аналізу в процесі безперервної подачі. Втрати енергії компонентів молотка та зіткнення часток для кожної точки аналізу були накопичені, а результати втрат енергії для 100 точок даних були підсумовані. Середнє значення обчислювалося тричі для отримання втрат енергії компонентів молотка під час чисельного моделювання на 1 с. Результати аналізу показані на рисунках 4.4-4.5.

Згідно з аналізом результатів на рисунку 4.4, втрати енергії компонентів молотка показали тенденцію зростання-зменшення-зростання зі збільшенням швидкостей шпинделя. Вища швидкість шпинделя призводила до вищої лінійної

швидкості в кінці молотка, що збільшувало ударну силу молотків по соломі, підвищувало кількість ударів по соломі та призводило до втрат енергії, що викликало високий відсоток перетвореної кукурудзяної соломи після обробки. Тому потрібно відповідно зменшити швидкість шпинделя. Згідно з результатами тестування продуктивності попереднього подрібнення, коли швидкість шпинделя становила 2500–2700 об/хв, ефект подрібнення був кращим, а виробництво на кВт·год було вищим. Тому, щоб забезпечити виробництво на кВт·год, швидкість шпинделя не повинна перевищувати 2700 об/хв, а втрати енергії компонентів молотка не повинні перевищувати 1290,1 Дж.

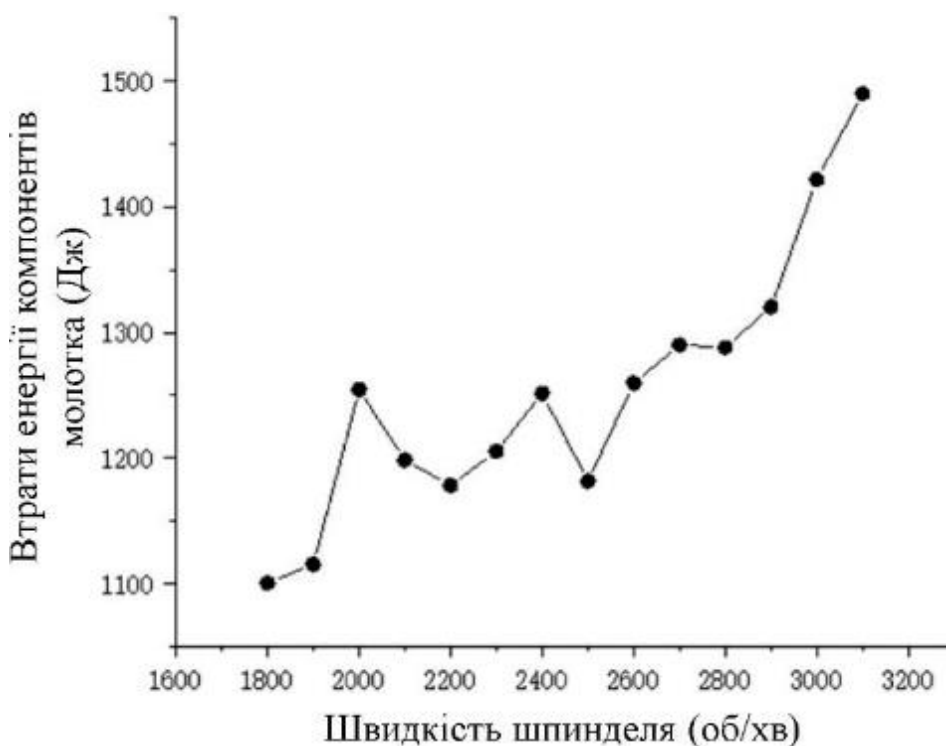


Рисунок 4.4 – Результати зміни втрат енергії компонентів молотка при різних швидкостях шпинделя

Згідно з аналізом результатів на малюнку 4.5, видно, що зі збільшенням зазору між молотком та ситом втрати енергії компонентів молотка показують зростаючу тенденцію. Коли зазор між молотком та ситом великий, довжина

молотка мала, що зменшує площу контакту між молотком і кукурудзяною соломою. Кукурудзяна солома повинна бути вражена багато разів, перш ніж її подрібнити до кваліфікованої кормової продукції і вивести з машини, тим самим споживаючи додаткову енергію та збільшуючи втрати енергії компонентів молотка. Згідно з результатами тестування продуктивності попереднього подрібнення, коли зазор між молотком і ситом становив 12-16 мм, ефект подрібнення був кращим, а виробництво на кВт·год було вищим. Тому втрати енергії компонентів молотка не повинні перевищувати 1312,2 Дж.

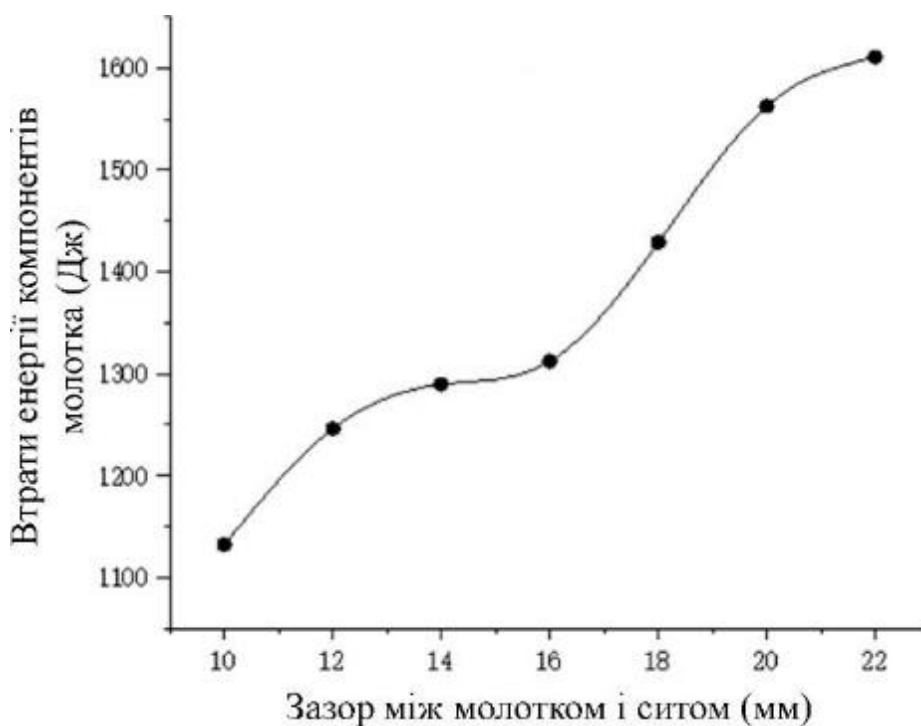


Рисунок 4.5 – Результати зміни втрат енергії компонентів молотка в залежності від зазору між молотком і ситом

Згідно з аналізом результатів на малюнку 17, втрати енергії компонентів молотка показали тенденцію до зменшення зі збільшенням діаметра отвору сита. Кукурудзяна солома не могла швидко вийти, коли діаметр отвору сита малий. Це призводило до повторних ударів по корму з кваліфікованим розміром часток, що збільшувало масову частку некваліфікованого корму та викликало витрати енергії.

Тому потрібно збільшити діаметр отвору сита для забезпечення ефективності ситування, а втрати енергії компонентів молотка повинні бути вищими за 985,6 Дж.

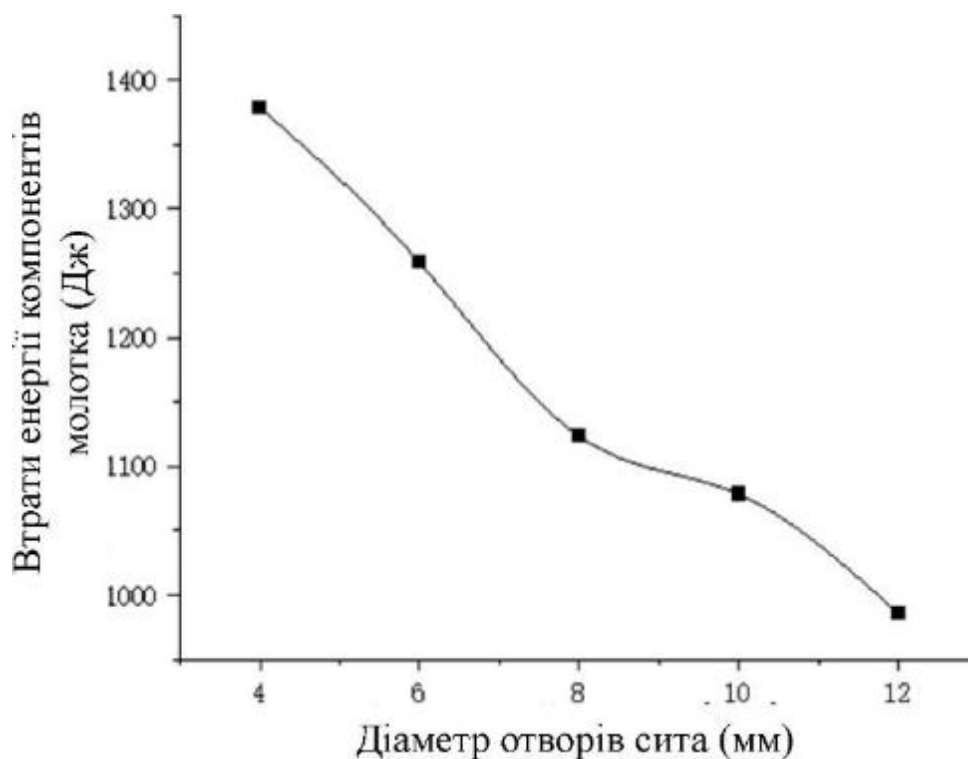


Рисунок 4.6 – Результати втрат енергії компонентів молотка в залежності від зміни діаметра отворів сита

На основі вищезазначених результатів можна зробити висновок, що коли втрати енергії компонентів молотка становлять 985,6–1312,2 Дж, ефект подрібнення є кращим, а виробництво на кВт·год є вищим.

Сила зіткнення між кукурудзяною соломою та компонентами молотка може відобразити ефект подрібнення, коли сила зіткнення досягає певного рівня для подрібнення соломи, і чим більша сила зіткнення, тим вища ефективність подрібнення. Згідно з тестуванням продуктивності подрібнення, швидкість шпинделя мала більш значний вплив на ефект подрібнення кукурудзяної соломи, тому швидкість шпинделя була використана як фактор тестування для аналізу сили

зіткнення кукурудзяної соломи, що показано на рисунку 4.7, де наведено векторні діаграми сили зіткнення соломи на 5-й секунді при різних швидкостях шпинделя.

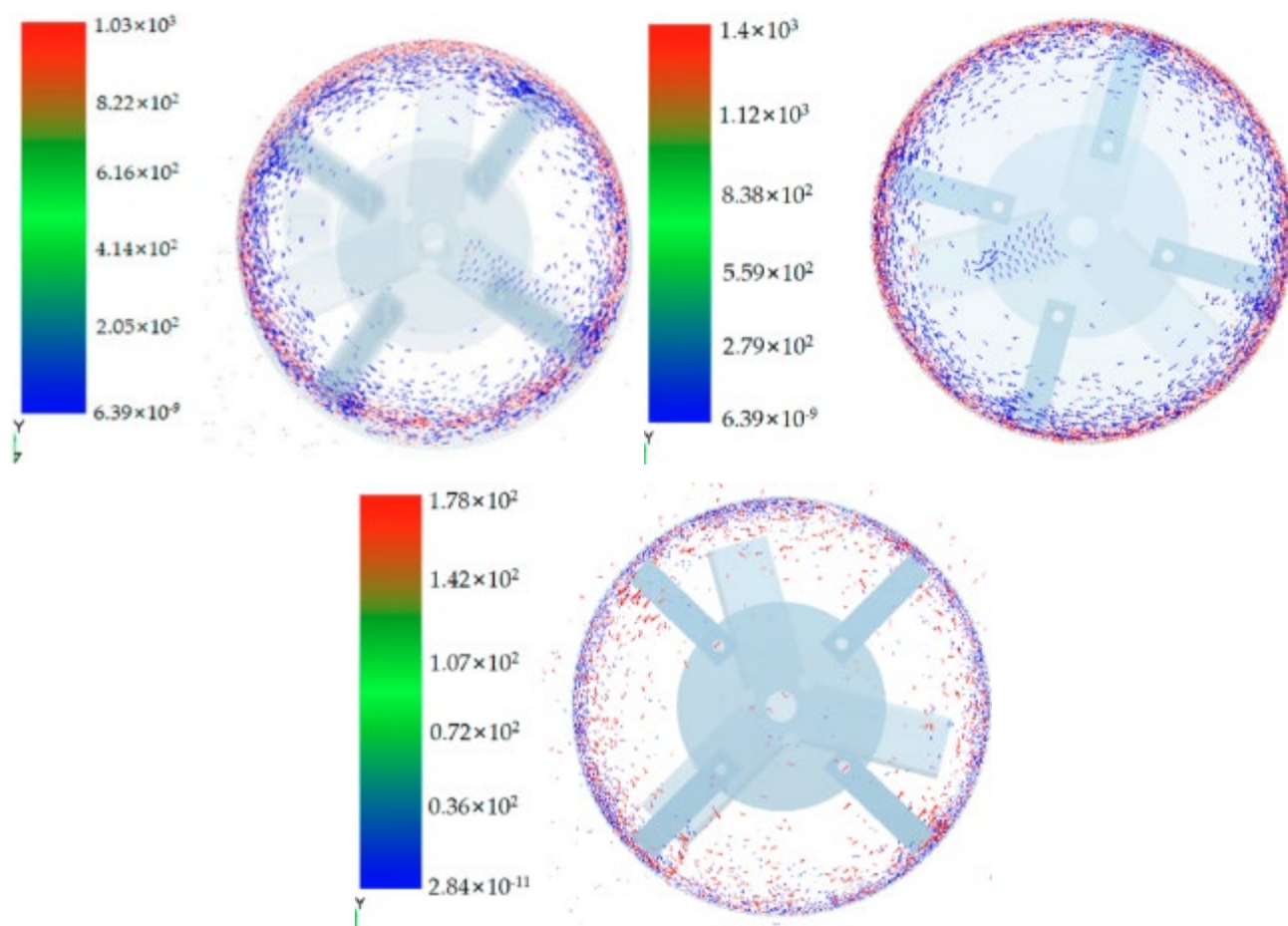


Рисунок 4.7 – Векторна діаграма сили зіткнення соломи при різних швидкостях обертання шпинделя

У чисельному моделюванні час роботи був встановлений на 5 секунд, а інтервал часу зберігання — 0,01 секунд. Для симуляції всіх часток було вибрано дискретне елементне чисельне моделювання кукурудзяної соломи, а для аналізу взято безперервну подачу тривалістю 1 секунду. Було виділено 100 точок даних. Сила зіткнення кукурудзяної соломи в кожній точці часу накопичувалася, після чого сила зіткнення для 100 точок була підсумована. В результаті отримано

загальну силу зіткнення кукурудзяної соломи. Сила зіткнення кукурудзяної соломи змінюється в залежності від швидкості шпинделя, що показано на рисунку 4.8.

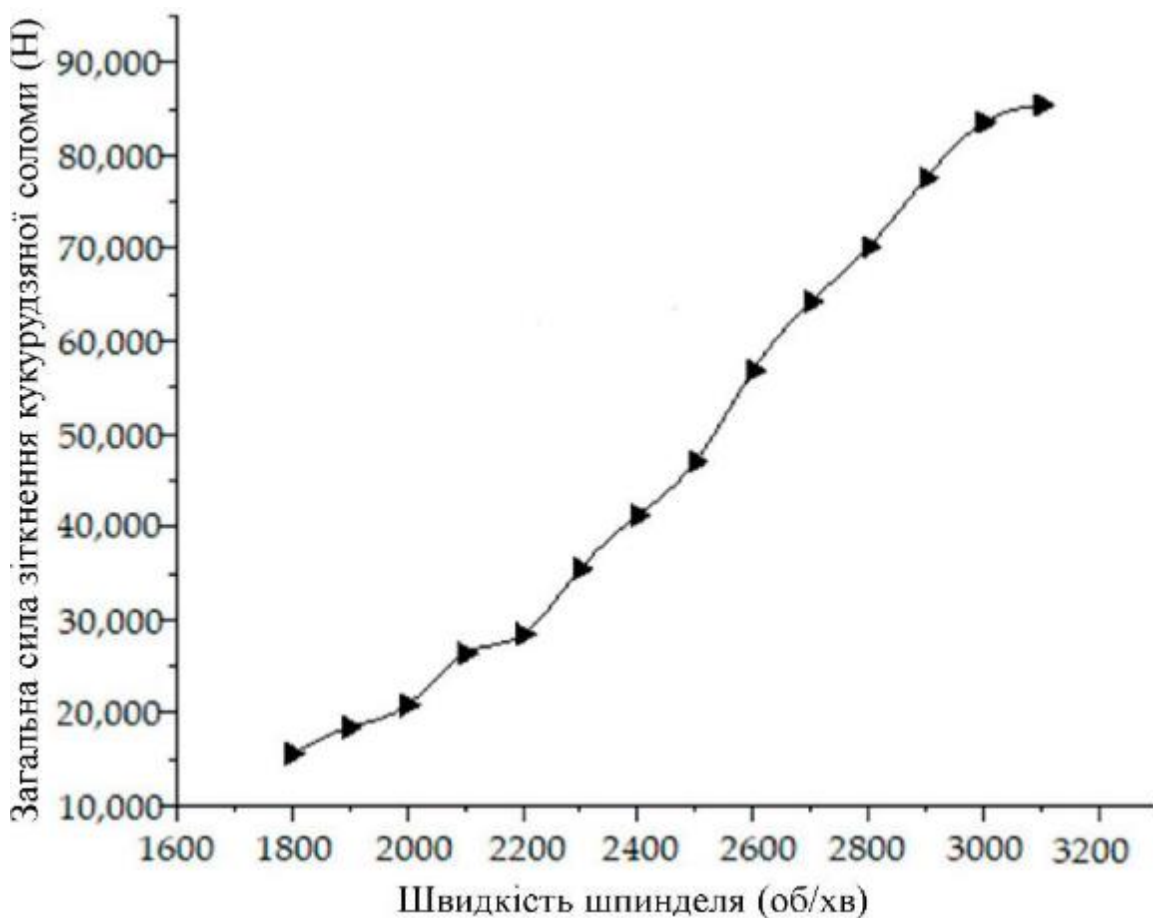


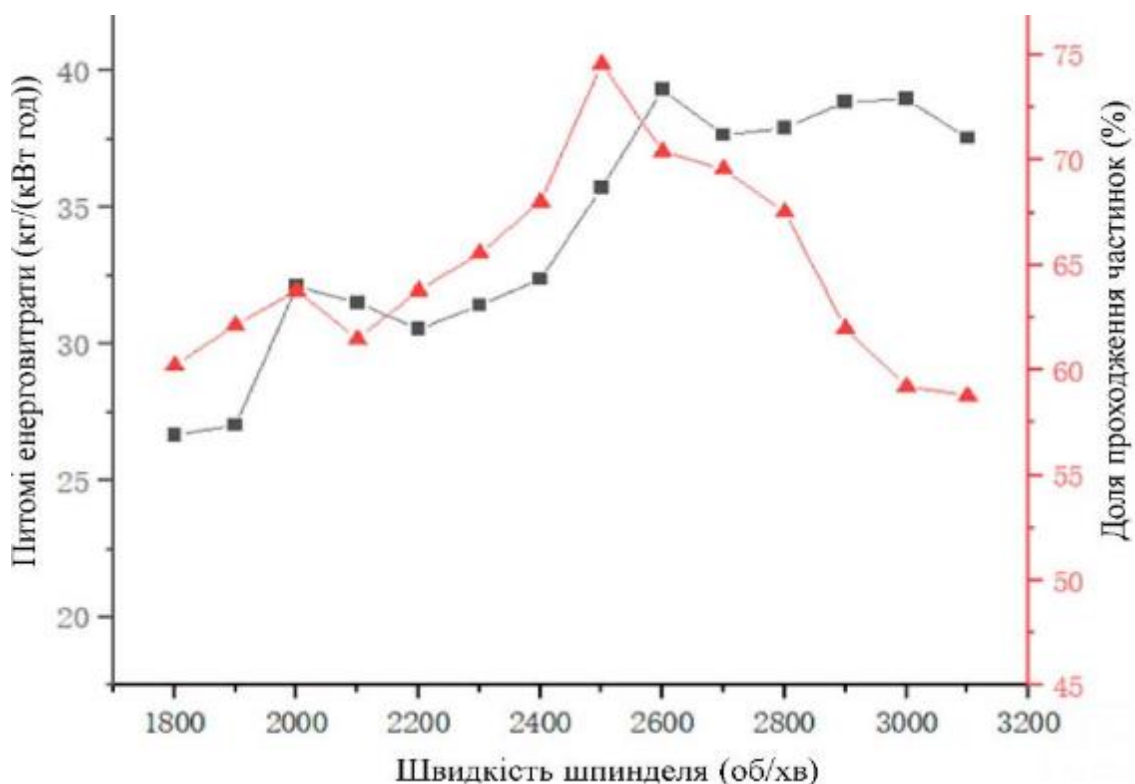
Рисунок 4.8 – Результати чисельного моделювання зміни сили зіткнення соломи зі зміною швидкості обертання шпинделя

Згідно з результатами аналізу тестування продуктивності попереднього подрібнення, ефект подрібнення був кращим, коли швидкість шпинделя перевищувала 2500 об/хв. У процесі чисельного моделювання, коли швидкість шпинделя становила 2500 об/хв, загальна сила зіткнення кукурудзяної соломи становила 47032,5 Н. Тому, щоб забезпечити кращий ефект подрібнення, загальна сила зіткнення кукурудзяної соломи повинна бути більшою за 47032,5 Н.

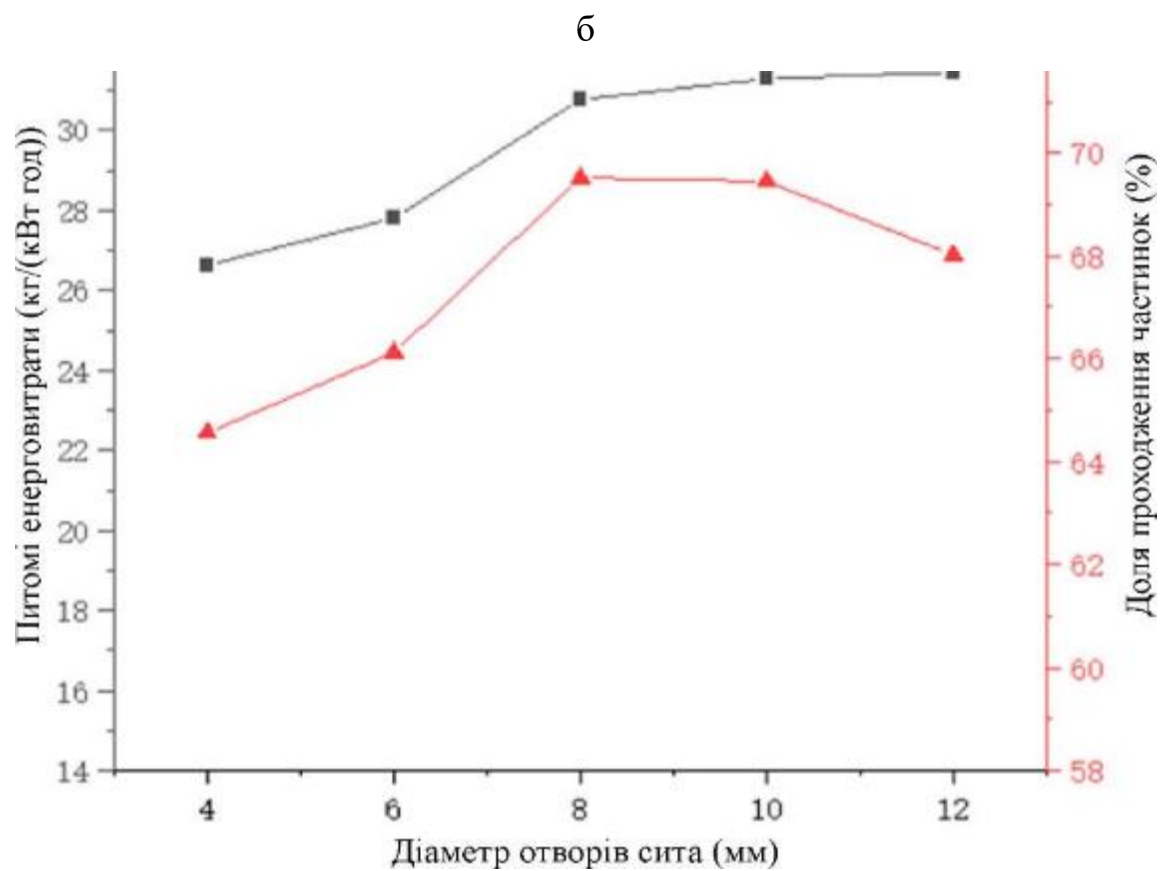
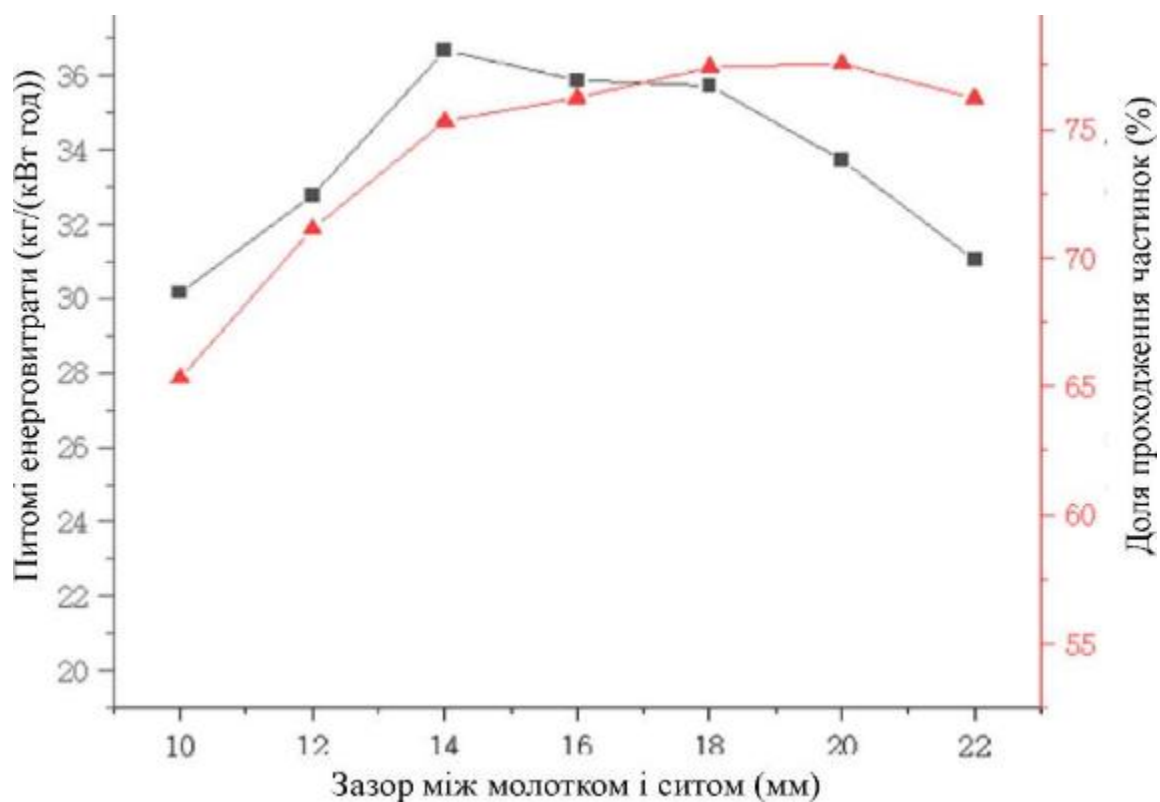
4.2 Результати експериментальних досліджень

Згідно з рис. 4.9 (а), можна побачити, що зі збільшенням частоти обертів шпинделя продуктивність на кВт·год спочатку зростала, а потім знижувалася. Найвищу продуктивність було досягнуто при швидкості обертання шпинделя 2600 об/хв. Коефіцієнт подрібнення також зростав і потім знижувався при збільшенні швидкості обертання шпинделя, і при 2500 об/хв продуктивність на кВт·год була найвищою. Тому, за результатами аналізу, оптимальна швидкість подрібнення кукурудзяної соломи знаходиться в межах 2500~2700 об/хв.

Згідно з рис. 4.9 (б), продуктивність на кВт·год спочатку зростала, а потім знижувалася зі збільшенням зазору між молотком та ситом, і найвища продуктивність спостерігалася при зазорі 14 мм. Коефіцієнт подрібнення збільшувався зі зростанням зазору. Тому оптимальний зазор між молотком і ситом для подрібнення кукурудзяної соломи складає 12~16 мм.



а



в

Рисунок 4.8 – Результати експериментальних досліджень

Згідно з рис. 4.9 (в), продуктивність на кВт·год спочатку зростала, а потім знижувалася зі збільшенням діаметра отвору сита. Найвищу продуктивність на кВт·год було досягнуто при діаметрі отвору сита 8 мм. Коефіцієнт подрібнення спочатку зростає, а потім знижується, і найвищим він був при діаметрі отвору сита 10 мм. Таким чином, оптимальний діаметр отвору сита для подрібнення кукурудзяної соломи становить 6~10 мм.

4.3 Оптимізація робочих параметрів подрібнювача

Оптимізація робочих параметрів дозволяє підвищити ефективність роботи та продовжити термін служби машини, значно зменшити витрати на виробництво, а також важлива для покращення структури обладнання.

Щоб досягти максимальної ефективності роботи молоткової дробарки, у цьому дослідженні було використано функцію оптимізації у програмі Design-Export 10 для двоцільової оптимізації продуктивності на кВт·год (Z) та коефіцієнта подрібнення (S). Після цього було проведено оптимізацію параметрів у поєднанні з діапазоном тестових значень для кожного фактора, щоб отримати набір оптимальних робочих параметрів. Обмеження були такими:

$$\begin{cases} \max Z \\ \max S \\ 2500 < A < 2700 \\ 12 < B < 16 \\ 6 < C < 10 \end{cases} \quad (4.1)$$

де A — швидкість обертання шпинделя (об/хв), B — зазор між молотком і ситом (мм), C — діаметр отвору сита (мм).

Після оптимізації були отримані такі оптимальні робочі параметри молоткової дробарки: швидкість обертання шпинделя — 2625 об/хв, зазор між молотком і ситом — 14 мм, діаметр отвору сита — 8 мм. За цими оптимізованими

параметрами було проведено повторне тестування продуктивності подрібнення, тестування проводилося тричі, а середнє значення було взято як кінцевий результат. Тестування показало, що продуктивність на кВт·год склала 36,85 кг/кВт·год, а коефіцієнт подрібнення — 76,56%.

На основі оптимізованих робочих параметрів було проведено числове моделювання за допомогою методу CFD–DEM з газо-твердофазним зчепленням. Симуляцію було повторено тричі для отримання середніх значень. Результати показали, що втрати енергії молотка склали 1189,5 Дж, а загальна сила зіткнення кукурудзяної соломи — 49 523,5 Н. Обидва значення знаходяться в межах оптимальних числових результатів, що підтверджує точність числового моделювання.

4.4 Висновки з розділу

1. Результати чисельного моделювання показали, що зі збільшенням часу, чим вища швидкість обертання шпинделя, тим швидше відбувається руйнування кожної частини зв'язків, і чим вища ефективність подрібнення, коли енергетичні втрати в компонентах молота становили 985,6~1312,2 Дж, а загальна сила зіткнення кукурудзяної соломи перевищувала 47032,5 Н; ефект подрібнення соломи був кращим.

2. Результати випробувань ефективності подрібнення показали, що коли швидкість обертання шпинделя становила 2500~2700 об/хв, зазор між молотом і сіткою — 12~16 мм, а діаметр отворів сітки — 6~10 мм, то вартість за кВт·год була вищою, а ступінь подрібнення — кращим. Після оптимізації робочих параметрів було отримано оптимальну комбінацію робочих параметрів: швидкість обертання шпинделя 2625 об/хв, зазор між молотом і сіткою 14 мм та діаметр отворів сітки 8 мм. На основі оптимальної комбінації робочих параметрів результати випробувань ефективності подрібнення були такими: вартість за

кВт·год становила 36,85 кг/(кВт·год), а процент проходження подрібнення — 76,56%.

3. Валідаційні випробування CFD–DEM газо-твердого зв'язку чисельного моделювання об'єднали оптимальні комбінації робочих параметрів. Результати показали, що енергетичні втрати в компонентах молота становили 1189,5 Дж, а загальна сила зіткнення кукурудзяної соломи — 49523,5 Н. Обидва значення перебували в межах оптимальних результатів чисельного моделювання, що підтвердило точність CFD–DEM газо-твердого зв'язку чисельного моделювання процесу подрібнення кукурудзяної соломи.

5 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

Охорона праці в Україні є важливим аспектом соціальної політики держави, спрямованим на забезпечення безпеки та здоров'я працівників на робочих місцях. Згідно з Конституцією України та іншими нормативно-правовими актами, держава зобов'язана забезпечувати охорону праці та створювати належні умови для роботи громадян.

Законодавча база

1. **Конституція України:** Гарантує право кожного на працю в безпечних і здорових умовах.
2. **Кодекс законів про працю України (КЗпП):** Встановлює основи трудового законодавства, включаючи питання охорони праці.
3. **Закон України «Про охорону праці»:** Регулює відносини у сфері охорони праці, визначає права і обов'язки роботодавців і працівників, а також відповідальність за порушення норм охорони праці.
4. **Постанови та накази Кабінету Міністрів України:** Включають в себе конкретні вимоги та стандарти щодо охорони праці в різних галузях.

Основні принципи охорони праці

1. **Принцип превенції:** Запобігання небезпечним і шкідливим виробничим факторам є головною метою охорони праці.
2. **Системний підхід:** Охорона праці повинна бути інтегрована у всі процеси управління підприємством.
3. **Відповідальність роботодавців:** Забезпечення безпечних умов праці є обов'язком роботодавців, які повинні здійснювати контроль за дотриманням вимог охорони праці.
4. **Активна участь працівників:** Працівники мають право і повинні брати участь у забезпеченні охорони праці, підвищуючи свою обізнаність про ризики.

Організація охорони праці

1. ***Служба охорони праці:*** Кожне підприємство повинно мати службу охорони праці, яка відповідає за реалізацію політики безпеки, навчання працівників та контроль за дотриманням норм охорони праці.

2. ***Атестація робочих місць:*** Всі робочі місця повинні бути атестовані для визначення відповідності вимогам охорони праці.

3. ***Навчання працівників:*** Регулярні інструктажі і тренінги щодо безпеки на робочому місці є обов'язковими для всіх працівників.

Охорона праці та безпека на виробництві є важливими аспектами, що забезпечують здоров'я та безпеку працівників. Кормоцехи, особливо ті, що займаються подрібненням стеблових кормів, мають свої специфічні ризики та небезпечні фактори, які можуть призвести до нещасних випадків і професійних захворювань. У цьому розділі розглянемо основні ризики, можливі надзвичайні ситуації, вимоги безпеки під час виконання робіт, а також режим праці та відпочинку.

Основні ризики та шкідливі фактори. На виробництві кормів до основних ризиків можна віднести:

1. ***Механічні ризики:*** Висока ймовірність травмування працівників при роботі з механізмами подрібнення (різальні ножі, обертові частини). Невірне використання обладнання може призвести до серйозних травм.

2. ***Електричні ризики:*** Неправильне підключення або технічна несправність електрообладнання можуть спричинити ураження електричним струмом.

3. ***Шум і вібрація:*** Тривалий вплив шуму (від 85 дБ) і вібрації може призвести до втрати слуху та інших професійних захворювань.

4. ***Запиленість:*** Висока концентрація пилу в повітрі під час подрібнення може викликати респіраторні захворювання.

5. **Температурні ризики:** Неправильні умови зберігання сировини та готових кормів можуть призвести до перегрівання або охолодження, що може негативно вплинути на якість продукції та здоров'я працівників.

Можливі надзвичайні ситуації. На кормовому виробництві можливі різні надзвичайні ситуації, такі як:

1. **Пожежі:** Імовірність виникнення пожежі через електричні короткі замикання, перегрів обладнання або займисті матеріали.

2. **Вибухи:** У разі накопичення пилу або при неправильному зберіганні сировини можуть виникнути вибухи.

3. **Пошкодження обладнання:** Поломка або збої в роботі машин можуть призвести до зупинки виробничого процесу.

4. **Травми працівників:** Нещасні випадки через недотримання правил безпеки.

Шляхи вирішення проблем. Для зниження ризиків та запобігання надзвичайним ситуаціям необхідно:

1. **Регулярне навчання:** Проводити інструктажі з охорони праці для всіх працівників, щоб підвищити рівень обізнаності про небезпеки.

2. **Технічний контроль:** Забезпечити регулярний технічний огляд та обслуговування обладнання для своєчасного виявлення та усунення несправностей.

3. **Контроль умов праці:** Виконувати моніторинг рівнів шуму, запиленості та температури в робочих зонах.

4. **Охорона здоров'я:** Забезпечити працівникам засоби індивідуального захисту (респіратори, захисні окуляри, шумозахисні навушники) та стежити за їх використанням.

5. **План дій у надзвичайних ситуаціях:** Розробити і впровадити план дій у разі виникнення надзвичайних ситуацій, включаючи евакуацію та надання першої медичної допомоги.

Шкідливі та небезпечні виробничі фактори. На виробництві кормів до шкідливих та небезпечних факторів можна віднести:

1. **Хімічні речовини:** Використання добавок, консервантів і мікробіологічних препаратів, які можуть бути небезпечними для здоров'я.
2. **Фізичні фактори:** Вплив шуму, вібрації та перепадів температури.
3. **Психоемоційні фактори:** Стрес та напруженість на роботі можуть негативно вплинути на загальний стан працівників.

Режим праці та відпочинку. З метою запобігання перевтомі та забезпечення ефективності праці важливо дотримуватись раціонального режиму праці та відпочинку. Рекомендується:

1. **Регулярні перерви:** Проводити короткі перерви кожні 1.5-2 години роботи для відновлення сил.
2. **Графік роботи:** Встановити чіткий графік, який передбачає не більше 8 годин роботи на день, з достатньою кількістю днів відпочинку.
3. **Фізична активність:** Заохочувати працівників до виконання фізичних вправ під час перерв, що допоможе знизити рівень стресу та втоми.

Вимоги безпеки при приготуванні кормів. Під час приготування кормів необхідно дотримуватись таких вимог безпеки:

1. **Контроль якості сировини:** Перед використанням сировини слід перевіряти її якість та безпечність.
2. **Захист органів дихання:** Використовувати респіратори або маски під час роботи з пилом.
3. **Очищення обладнання:** Регулярно очищати обладнання після завершення роботи для запобігання забрудненню.
4. **Уважність при роботі:** Працювати з максимальною уважністю, дотримуючись усіх правил безпеки.

Вимоги безпеки під час виконання роботи. Під час виконання робіт у кормоцеху слід дотримуватись таких вимог безпеки:

1. **Заборона на вхід сторонніх осіб:** Уникайте доступу неавторизованих осіб до виробничих приміщень.
2. **Погодженість дій:** У разі роботи в команді необхідно узгоджувати дії для запобігання нещасним випадкам.
3. **Використання засобів індивідуального захисту:** Кожен працівник повинен використовувати засоби індивідуального захисту відповідно до вимог безпеки.
4. **Регулярні перевірки:** Проводити регулярні перевірки дотримання правил охорони праці.

Охорона праці та безпека в кормоцеху по подрібненню стеблових кормів є важливими складовими, які впливають на продуктивність праці та здоров'я працівників. Систематичний підхід до управління ризиками, впровадження навчання та дотримання вимог безпеки дозволять знизити кількість нещасних випадків і підвищити загальний рівень безпеки на виробництві.

6 ЕКОНОМІЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ ПОДРІБНЮВАЧА СТЕБЛОВИХ КОРМІВ

Для проведення економічного розрахунку використання нового подрібнювача стеблових кормів, зокрема порівняння його з базовим варіантом CPS-420, спочатку визначимо всі необхідні витрати. Розрахунки проведемо за наступними параметрами.

Таблиця 6.1 – Вихідні дані

№	Показник	Розм.	CPS-420 (базовий варіант)	Новий варіант
1	Продуктивність	т/год	3,0	4,0
2	Максимальна споживана потужність	кВт	7	5
3	Вартість Ц	грн.	150000	175000
4	Річне навантаження обладнання	т/рік	5000	5000

1. Амортизаційні відрахування $A = \text{вартість} \times \text{норма амортизації}$

Для CPS-420: $A_B = 150 \times 0,12 = 18$ тис. грн.

Для нового варіанту: $A_H = 175 \times 0,12 = 21$ тис. грн.

2. Витрати на поточний ремонт та реновацію $R = \text{вартість} \times \text{норма відрахувань на ремонт}$

Для CPS-420: $R_B = 150 \times 0,13 = 19,5$ тис. грн.

Для нового варіанту: $R_H = 175 \times 0,13 = 22,75$ тис. грн.

3. Витрати на оплату праці $W = Q \times \text{тарифна ставка} \times (1+k_d) W$

Години роботи на рік $Q = \text{річне навантаження} / \text{продуктивність} \times \text{час на обробку 1 т}$

Для CPS-420: $Q_B = 5000 / 3 = 1666,67$ год.

$W_B = 1666,67 \times 80 \times 1,22 = 162666,67$ грн.

Для нового варіанту: $Q_H = 5000 / 4 = 1250$ год.

$$W_H = 1250 \times 80 \times 1,22 = 122000 \text{ грн.}$$

4. Витрати на споживання електроенергії $E = \text{річне навантаження} \times \text{потужність} \times \text{вартість електроенергії}$

$$\text{Для CPS-420: } E_B = 5000 \times 7 \times 5,7 = 199500 \text{ грн.}$$

$$\text{Для нового варіанту: } E_H = 5000 \times 5 \times 5,7 = 142500 \text{ грн.}$$

Таблиця 6.2 – Зведена таблиця витрат

№	Показник	CPS-420 (базовий варіант), тис. грн.	Новий варіант, тис. грн.
1	Амортизаційні відрахування (А)	18	21
2	Витрати на ремонт (R)	19,5	22,75
3	Витрати на оплату праці (W)	162,67	122
4	Витрати на електроенергію (E)	199,5	142,5
5	Загальні витрати (З)	399,67	308,25

5. Річні експлуатаційні витрати

$$\text{Загальні витрати } Z_B = 18 + 19,5 + 162,67 + 199,5 = 399,67 \text{ тис. грн.}$$

$$\text{Загальні витрати } Z_H = 21 + 22,75 + 122 + 142,5 = 308,25 \text{ тис. грн.}$$

6. Економічний ефект

$$E = Z_B - Z_H = 399,67 - 308,25 = 91,42 \text{ тис. грн.}$$

7. Термін окупності

$$T = (ЦН - ЦБ) / E = (175 - 150) / 91,42 \approx 0,27 \text{ року}$$

Згідно з проведеними розрахунками, впровадження нового подрібнювача стеблових кормів забезпечує зниження річних експлуатаційних витрат на 91,42 тис. грн. у порівнянні з базовим варіантом CPS-420. Термін окупності нового обладнання становить приблизно 0,27 роки, що робить його економічно вигідним вибором для аграрного сектору.

ВИСНОВКИ

1. В Україні спостерігається зниження темпів виробництва продукції тваринництва, зокрема через недостатню якість і кількість кормів, що обмежує реалізацію генетичного потенціалу тварин. Якість кормів є критично важливою для підвищення продуктивності тварин, оскільки вона складає до 70% собівартості виробництва. У світлі змін клімату та скорочення поголів'я, необхідно впроваджувати інноваційні агрономічні стратегії та новітні технічні засоби для покращення виробництва кормів. Крім того, фізико-механічні властивості стеблових кормів мають велике значення для їх використання та обробки, і удосконалення цих характеристик сприятиме підвищенню ефективності тваринництва. Різноманітність технічних рішень для подрібнювачів стеблових кормів дозволяє агрономам оптимізувати процеси, знижувати енерговитрати і поліпшувати якість кормів, що є важливим кроком до сталого розвитку галузі.

2. Процес подрібнення кукурудзяної соломи в молотковій дробарці є складною взаємодією між молотками, ситом і матеріалом, де важливими чинниками є маса і швидкість молотків, розміри ротора, зазор між молотком і ситом, а також опір повітря. Ефективність подрібнення значно залежить від швидкості обертання шпинделя, лінійної швидкості молотків та характеристик руху соломи. Для оптимізації процесу подрібнення важливо враховувати ці параметри, що дозволяє визначити оптимальні умови для підвищення ефективності та результативності обробки кукурудзяної соломи. Числове моделювання та експериментальні дослідження на основі цих чинників можуть сприяти подальшому вдосконаленню технології.

3. У дослідженні було успішно створено чисельні моделі молоткової дробарки та кукурудзяної соломи з використанням програмного забезпечення Simcenter Star-CCM+, що дозволило досягти високої точності симуляцій завдяки оптимізації сітки з 5051110 елементів. Розроблена модель кукурудзяної соломи,

що враховувала три типи часток, разом із використанням моделі Герца-Міндліна для моделювання механіки контактів, відобразила реальні фізичні властивості часток. Налаштування параметрів симуляції забезпечило стабільність обчислень, а оцінка продуктивності молоткової дробарки відповідала національному стандарту, що дозволило ефективно аналізувати енерговитрати (кВт·год) та продуктивність подрібнення. Це створює умови для подальшого вдосконалення процесів подрібнення.

4. Чисельне моделювання процесу подрібнення кукурудзяної соломи виявило, що збільшення швидкості обертання шпинделя призводить до більш швидкого руйнування часток зв'язків і підвищення ефективності подрібнення. Оптимальні параметри для досягнення кращої ефективності включали швидкість обертання шпинделя 2625 об/хв, зазор між молотом і сіткою 14 мм, та діаметр отворів сітки 8 мм, що забезпечило питомі енерговитрати 36,85 кг/(кВт·год) і процент проходження подрібнення 76,56 %. Валідаційні випробування підтвердили точність чисельного моделювання, оскільки отримані енергетичні втрати і сила зіткнення відповідали оптимальним значенням, що свідчить про ефективність та надійність застосованої моделі CFD–DEM для аналізу процесу подрібнення.

5. Згідно з проведеними розрахунками, впровадження нового подрібнювача стеблових кормів забезпечує зниження річних експлуатаційних витрат на 91,42 тис. грн. у порівнянні з базовим варіантом CPS-420. Термін окупності нового обладнання становить приблизно 0,27 роки, що робить його економічно вигідним вибором для аграрного сектору.

Бібліографія

1. Алієв, Е. Б. (2023). Чисельне моделювання процесів агропромислового виробництва: підручник. Київ: Аграрна наука. <https://doi.org/10.31073/978-966-540-584-9>
2. Zhou, N. Y. (2020). Economic status and future prospects of China's feed industry. *China Feed*, 664, 128–131.
3. Wang, Y. Q., Zhang, H. G., Meng, H. B., & Liu, W. W. (2023). Promotion and application of corn straw feed technology. *China Animal Health*, 25, 73–74.
4. Zhang, X. L. (2022). Analysis of the application of crop straw feed in breeding. *Journal of Smart Agriculture*, 2, 63–64.
5. Liu, T. L., Zhao, L. X., & Meng, H. B. (2020). Research and optimization of evaluation methods for straw energy utilization technology. *Environmental Engineering*, 38, 195–200.
6. Wondra, K. J., Hancock, J. D., Behnke, K. C., Hines, R. H., & Stark, C. R. (1995). Effects of particle size and pelleting on growth performance, nutrient digestibility, and stomach morphology in finishing pigs. *Journal of Animal Science*, 73, 757–763.
7. Röhe, I., Ruhnke, I., Knorr, F., Mader, A., Boroogeni, F. G., Löwe, R., & Zentek, J. (2014). Effects of grinding method, particle size, and physical form of the diet on gastrointestinal morphology and jejunal glucose transport in laying hens. *Poultry Science*, 93, 2060–2068.
8. Wang, D., He, C. B., Tian, H. Q., Liu, F., Zhang, T., & Zhang, H. Q. (2020). Parameter optimization and experimental research on the hammer mill. *INMATEH - Agricultural Engineering*, 62, 341–350.
9. Tian, H. Q., Wang, H. Q., Huang, T., Wang, D., Liu, F., & Han, B. S. (2018). Design of combination sieve for hammer feed mill to improve crushing performance. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 34, 45–52.

10. Zeng, Z. W., Ma, X., Cao, X. L., Zehua, L. I., & Xicheng, W. (2021). Critical review of applications of discrete element method in agricultural engineering. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Machinery*, 52, 1–20.
11. Li, X. Q. (2020). The stimulation of maize crushing by hammer mill and the test of hammer performance based on discrete element method (Master's thesis, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot, China).
12. Bian, X. L., Hou, Y. J., Zhao, M., & Yang, Y. Y. (2015). DEM and its application to particle pulverization. *Mining Machinery*, 43, 62–67.
13. Jiménez-Herrera, N., Barrios, G. K. P., & Tavares, L. M. (2017). Comparison of breakage models in DEM in simulating impact on particle beds. *Advances in Powder Technology*, 29, 692.
14. Weerasekara, N. S., Powell, M. S., Cleary, P. W., Tavares, L. M., Evertsson, M., Morrison, R. D., Quist, J., & Carvalho, R. M. (2013). The contribution of DEM to the science of comminution. *Powder Technology*, 248, 3–24.
15. Xu, Y., Zhang, X., Wu, S., Chen, C., Wang, J., Yuan, S., Chen, B., Li, P., & Xu, R. (2020). Numerical simulation of particle motion at cucumber straw grinding process based on EDEM. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 13, 227–235.
16. Naik, S., & Chaudhuri, B. (2011). Investigating granular milling in a hammer mill: Experiments and simulation. *WIT Transactions on Modeling and Simulation*, 15, 121–132.
17. Shi, Y., Xin, S., Wang, X., Hu, Z., Newman, D., & Ding, W. (2019). Numerical simulation and field tests of minimum-tillage planter with straw smashing and strip laying based on EDEM software. *Computers and Electronics in Agriculture*, 166, 105021.
18. Pei, G., Zhai, Z. P., Lan, Y. Z., & Shi, S. C. (2023). Analysis of coupling motion characteristics of material and air flow in multi-function forage kneading

machine. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Machinery*, 54(Suppl. S2), 156–163.

19. Gu, F. W., Zhao, Y. Q., Wu, F., Hu, Z. C., & Shi, L. L. (2022). Simulation analysis and experimental validation of conveying device in uniform rushed straw throwing and seed-sowing machines using CFD-DEM coupled approach. *Computers and Electronics in Agriculture*, 193, 106720.

20. Han, D. D., Zhang, D. X., Yang, L., Tao, C., Youqiang, D., & Xiaohui, B. (2017). Optimization and experiment of inside-filling air-blowing seed metering device based on EDEM-CFD. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Machinery*, 48, 43–51.

21. Cao, L., Zhang, Y., Zhang, Y., & Li, Y. (2016). Influence of screen parameters optimization on screening efficiency of feed hammer mill. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 32, 284–288.

22. Li, Q. (2020). Research on improving the screening efficiency of hammer mill (Master's thesis, Inner Mongolia University of Science & Technology, Hohhot, China).

23. Hirohisa, T., Hideya, N., Tomohiro, I., & Watano, S. (2012). Numerical modeling of fluid and particle behaviors in impact pulverizer. *Powder Technology*, 217, 148–156.

24. Jayasundara, C. T., Yang, R. Y., Guo, B. Y., Yu, A. B., Govender, I., Mainza, A., van der Westhuizen, A., & Rubenstein, J. (2011). CFD-DEM modeling of particle flow in IsaMills—Comparison between simulations and PEPT measurements. *Minerals Engineering*, 24, 181–187.

25. Wang, X., Tian, H. Q., Xiao, Z. Q., Li, D. P., Ren, X. G., Cheng, X., & Liu, F. (2023). Determination of physical parameters of corn straw stem node contact and calibration of discrete element numerical simulation. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 51, 162–170.

26. Zhang, T., Liu, F., Zhao, M. Q., Ma, Q., Fan, Q., & Yan, P. (2018). Moving law of straw groups with different rotating speed based on discrete element method. *Journal of Agricultural Mechanization Research*, 40, 195–199.
27. Wang, D. (2022). Study on formation mechanism of benign gas-solid flow field and sieve structure optimization of hammer mill (Ph.D. thesis, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot, China).
28. Wang, H. Q. (2019). Flow field analysis and performance experiment study on hammer feed mill (Master's thesis, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot, China).
29. GB/T 6971-2007. (2007). Test method for feed mills. The State Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China China National Standardization Management Committee: Beijing, China.
30. Fei, Q., Zhao, W. Y., Dai, F., & Li, L. L. (2014). Combined plate-tooth threshing device based on BP neural network and genetic algorithm parameter optimization. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 42, 351–354.
31. Chen, W. X., Tai, J. B., Chen, Z. C., Liu, Y., & Zheng, S. H. (2024). Design and parameter optimization of trenching and soil-throwing blade for ecological tea garden by discrete element method. *Journal of Fujian Agricultural and Forestry University (Natural Science Edition)*, 53, 136–144.
32. Wang, Z., Zhao, W. Y., Shi, L. R., Sun, B. G., Sun, W., Dai, F., Zhou, G., Guo, J. H., Rao, G., & Li, H. (2024). Optimization of the motion parameters of a rolling spoon type precision hole planter based on DEM-MBD coupling. *Journal of China Agricultural University*, 29, 66–77.
33. Cao, L. Y., Shi, X. H., Shi, W., & Pei, Y. W. (2017). Simulation and analysis on flow field in crashing cavity of new-type feed hammer mill. *Journal of Agricultural Mechanization Research*, 39, 22–26.

34. Zhang, F. W., Song, X. F., Zhang, X. K., Zhang, F. Y., Wei, W. C., & Dai, F. (2019). Simulation and experiment on mechanical characteristics of kneading and crushing process of corn straw. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 35, 58–65.

35. Liu, Y. C., Zhang, F. W., Song, X. F., Wang, F., Zhang, F. Y., Li, X. Z., & Cao, X. Q. (2022). Study on mechanical properties for corn straw of double-layer bonding model based on discrete element method. *Journal of Northeast Agricultural University*, 53, 45–54.

36. Алієв, Е. Б., Пацула, О. М., & Гриценко, В. Т. (2017). Технологія комплексної безвідхідної переробки макухи з насіння олійних культур з одержанням високоякісних повноцінних протеїнових добавок у вигляді пелет та твердого біопалива: Науково-методичні рекомендації. Інститут олійних культур Національної академії аграрних наук України. Електронний аналог друкованого видання (електронна книга). Запоріжжя: СТАТУС. ISBN 978-617-7353-59-0.

37. Алієв, Е. Б. (2019). Фізико-математичні моделі процесів прецизійної сепарації насінневого матеріалу соняшнику: монографія. Запоріжжя: СТАТУС. 196 с. ISBN 978-617-7759-32-3.

38. Алієв, Е. Б., Миколенко, С. Ю., Сова, Н. А., та ін. (2022). Техніко-технологічне забезпечення безвідходної переробки зернової сировини у харчові продукти і корми: колективна монографія (за заг. ред. Е. Б. Алієва). Дніпро: ЛІРА. 192 с. ISBN 978-966-981-687-0.

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

Обґрунтування конструктивно-технологічних параметрів подрібнювача стеблових кормів

Виконав: магістрант групи МгАІ-2-23
Осьмак Вячеслав Олександрович

Керівник: доктор філософії
Лушко Кристина Олегівна

Дніпро, 2024

Додатки

Мета досліджень – вдосконалення конструктивно-технологічної схеми подрібнювача стеблових кормів і об'рунтування його параметрів для забезпечення покращення якості кормів, зниження енерговитрат та підвищення економічної доцільності.

Для досягнення цієї мети передбачається виконати наступні **задачі досліджень**:

1. Проаналізувати фізико-механічні властивості стеблових кормів і їх вплив на процес подрібнення, визначивши ключові фактори для оптимізації конструктивно-технологічної схеми подрібнювача.
2. Дослідити вплив конструктивних параметрів молоткової дробарки (швидкість обертання шпинделя, розміри ротора, зазор між молотками і ситом) на ефективність подрібнення стеблових кормів.
3. Розробити чисельну модель процесу подрібнення з використанням CFD–DEM підходу для моделювання взаємодії молотків, сита і часток стеблових кормів.
4. Провести валідаційні експерименти для підтвердження достовірності чисельного моделювання та оцінити основні показники роботи подрібнювача.
5. Визначити оптимальні конструктивно-технологічні параметри молоткової дробарки для досягнення високої продуктивності при зниженні енергетичних витрат.
6. Розрахувати економічну ефективність використання удосконаленого подрібнювача порівняно з базовим варіантом, оцінити термін окупності та потенціал впровадження обладнання в аграрному секторі.

Фізико-механічних властивостей різних стеблових кормів

Властивість	Кукурудзяна солома	Пшенична солома	Ячмінна солома	Люцерна (сіно)
Щільність, кг/м ³	110–150	90–120	85–115	140–180
Вологість, %	8–15	8–12	9–14	15–20
Механічна міцність, МПа	1.5–2.3	1.2–1.8	1.1–1.6	2.5–3.0
Гнучкість, %	18–25	12–20	10–18	20–30
Подрібнованість, %	75–80	70–75	68–73	80–85
Засвоюваність, %	55–60	50–55	52–57	65–70
Коефіцієнт тертя	0.35–0.40	0.30–0.35	0.28–0.33	0.40–0.45
Коефіцієнт стиснення	0.15–0.20	0.12–0.18	0.11–0.16	0.20–0.25

Геометричні розміри стеблових кормів

Параметр	Кукурудзяна солома	Пшенична солома	Ячмінна солома	Люцерна (сіно)
Довжина, мм	200–300	150–250	120–220	200–350
Діаметр, мм	5–10	3–7	2–6	4–9
Співвідношення довжини до діаметра (L/D)	20–40	25–50	30–55	25–45





Подрібноувач соломи
ISS-180



Подрібноувач IRR-1M



Подрібноувач рулонів
IR-1,8



Роторний подрібноувач
кормів RIK-88

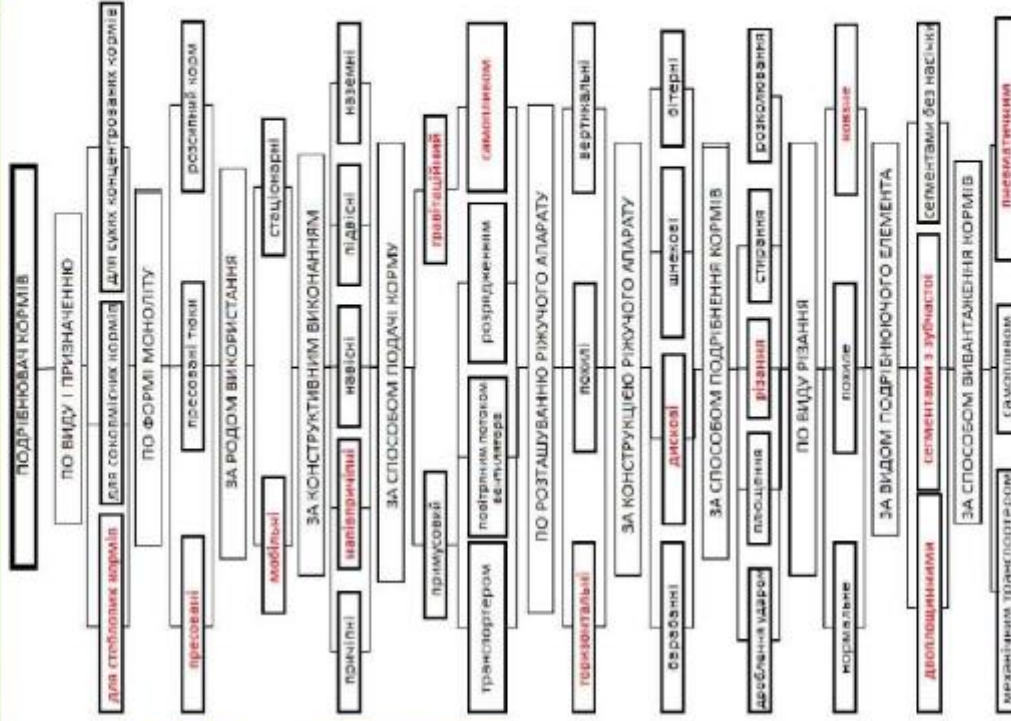


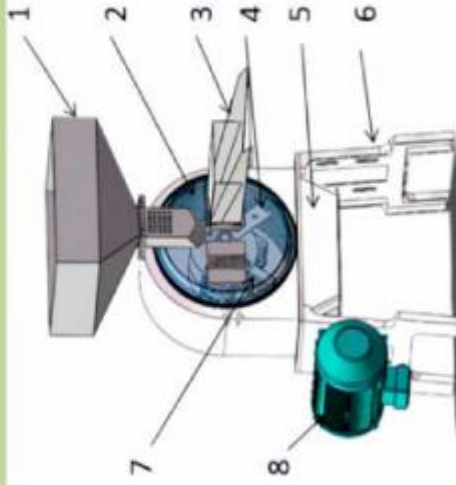
Кормоподрібноувач
KR-02



Соломорізка HX

Подрібноувачі стеблових кормів





Трицимійна модель молоткової дробарки: 1 – верхній завантажувальний бункер; 2 – сито; 3 – нижній завантажувальний бункер; 4 – ніж для соломи; 5 – вихід; 6 – рама; 7 – молоток; 8 – двигун

Диференційне рівняння руху матеріалів уздовж молота

$$\frac{d_{\text{ок}}}{dt} = g (\mu \cos \gamma_4 - \sin \gamma_4) + \omega^2 L (\sin \gamma_2 + \cos \gamma_2) - 2\mu\omega_1 u_r - \frac{\omega_1 L}{2 \cos \gamma_1} C_1 \rho_1 S_1 (\cos \gamma_3 - \sin \gamma_3)$$

де G — вага кукурудзяної соломи (H); F_D — сила тертя однієї кукурудзяної соломи (H); F_r — сила тертя молотка по кукурудзяній соломі (H); F_{H1} — сила тертя сита по кукурудзяній соломі (H); F_k — опір повітря (H); F_{ic} — сила інерції Коріоліса (H); D — зовнішній діаметр ротора (m); μ — коефіцієнт тертя кукурудзяної соломи з ситом і молотком; δ — зазор між молотком і ситом (m); C — коефіцієнт опору повітря; ρ — густина повітря ($кг/м^3$); S — площа, на яку діє вітер, у кукурудзяній соломі ($м^2$); v_2 — відносна швидкість соломи та повітря ($м/с$).

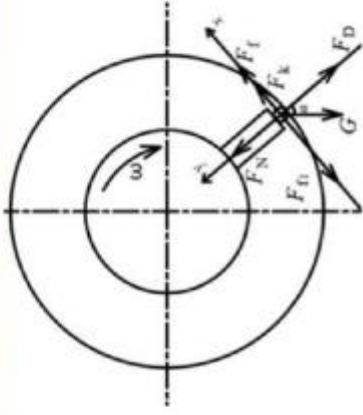


Схема аналізу напружень кукурудзяної соломи

Закон збереження імпульсу

$$Mv = Mv_1 + mv_2 \quad \begin{cases} v = \frac{\pi n_1 D}{60} \\ v_1 = \frac{\pi n_2 D}{60} \end{cases} \quad v_2 = \frac{\pi M D (n_1 - n_2)}{60 m}$$

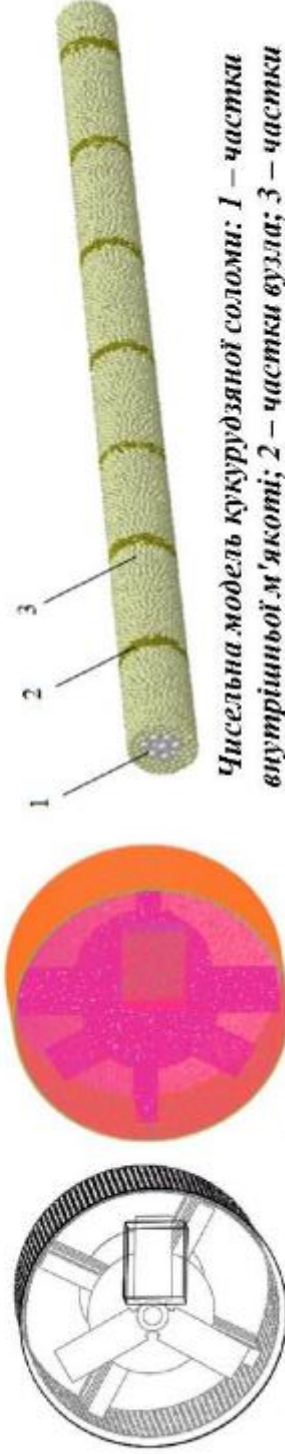
Рівняння рівноваги сил тертя кукурудзяної соломи

$$\begin{cases} F_t = \mu F_D \\ F_{H1} = \mu m \frac{v^2}{D + \delta} = \mu \frac{m^2 \pi^2 D^2 (n_1 - n_2)^2}{3600 (D + \delta)} \\ F_{ic} = 2m\omega v_t \\ F_k = \frac{1}{2} C \rho S v_2^2 \end{cases} \quad \begin{cases} \sum F_x = 0 \quad G \sin \alpha + F_{H1} - F_k - F_t = 0 \\ \sum F_y = 0 \quad F_D + G \cos \alpha - F_k = 0 \\ F_D = \mu \frac{M^2 \pi^2 D^2 (n_1 - n_2)^2}{3600 m (D + \delta)} \end{cases}$$

де M — маса молотка ($кг$); m — маса однієї кукурудзяної соломи ($кг$); v — лінійна швидкість молотка ($м/с$); v_1 — швидкість молотка після удару по кукурудзяній соломі ($м/с$); v_2 — швидкість кукурудзяної соломи після удару ($м/с$); ρ_1 — швидкість молотка перед ударом по кукурудзяній соломі ($об/хв$); ρ_2 — швидкість обертання молотка після удару по кукурудзяній соломі ($об/хв$).

Методика чисельного моделювання процесу подрібнення стеблових кормів 6

Чисельну модель молоткової дробарки було створено за допомогою програмного забезпечення Simcenter Star-CCM+.



Чисельна модель кукурудзяної соломи: 1 – частки внутрішньої м'якоти; 2 – частки вузла; 3 – частки зовнішньої оболонки

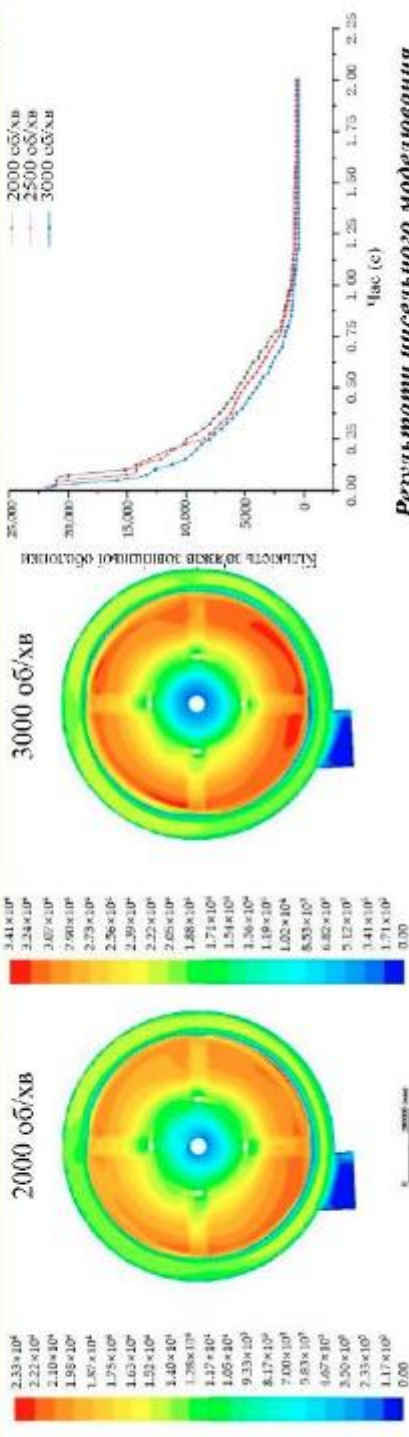
Спрощена модель Розбиття на сітки

Налаштування параметрів моделі Герца-Мінділіна із зчепленням

Параметр	Нормальна жорсткість (Н/м ²)	Зсувна жорсткість (Н/м ²)	Критичне нормальне напруження (Па)	Критичне зсувне напруження (Па)
Зовнішня оболонка–зовнішня оболонка	5.5×10^9	5.2×10^8	1.22×10^8	7.89×10^6
Внутрішня м'якоть–внутрішня м'якоть	5.05×10^8	5×10^7	1.4×10^6	3.9×10^5
Вузол–вузол	5.23×10^8	4.89×10^7	1.35×10^6	3.88×10^5
Зовнішня оболонка–внутрішня м'якоть	5.05×10^8	5×10^7	1.4×10^6	3.9×10^5
Зовнішня оболонка–вузол	5.21×10^8	5.02×10^7	1.39×10^6	3.68×10^5
Внутрішня м'якоть–вузол	5.05×10^8	5×10^7	1.4×10^6	3.9×10^5

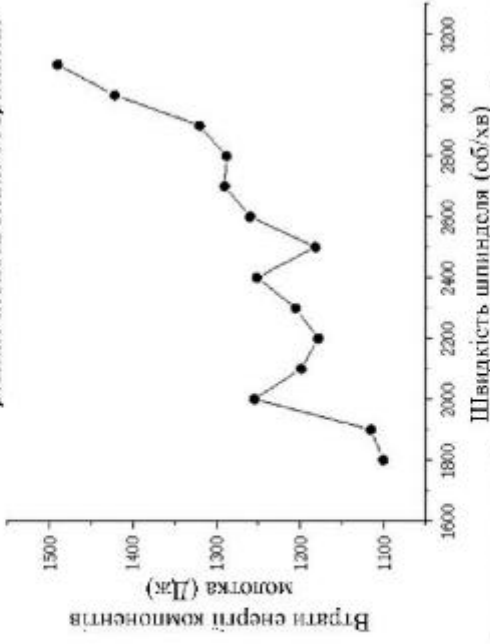
Для точної оцінки продуктивності подрібнення молоткової дробарки було використано стандарт: GB/T6971-2007 «Test method for feed mills» («Метод випробування комбикормових заводів»)

Результати чисельного моделювання процесу подрібнення стеблових кормів 7

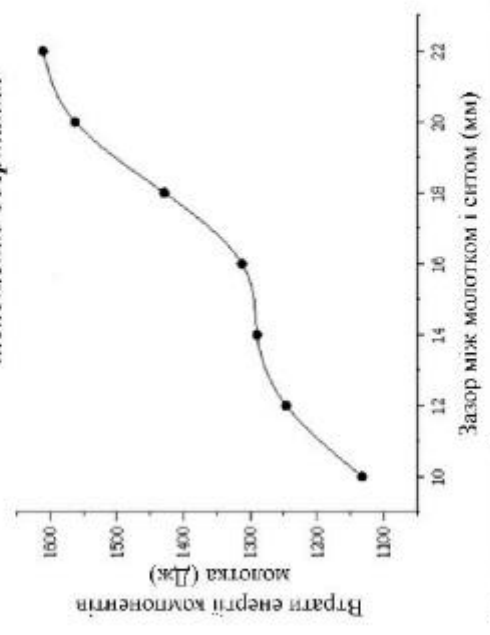


Результати чисельного моделювання зміни зв'язків зовнішньої оболонки зі швидкістю обертання

Зміна швидкості в потіці всередині камери подрібнення при різних швидкостях обертання

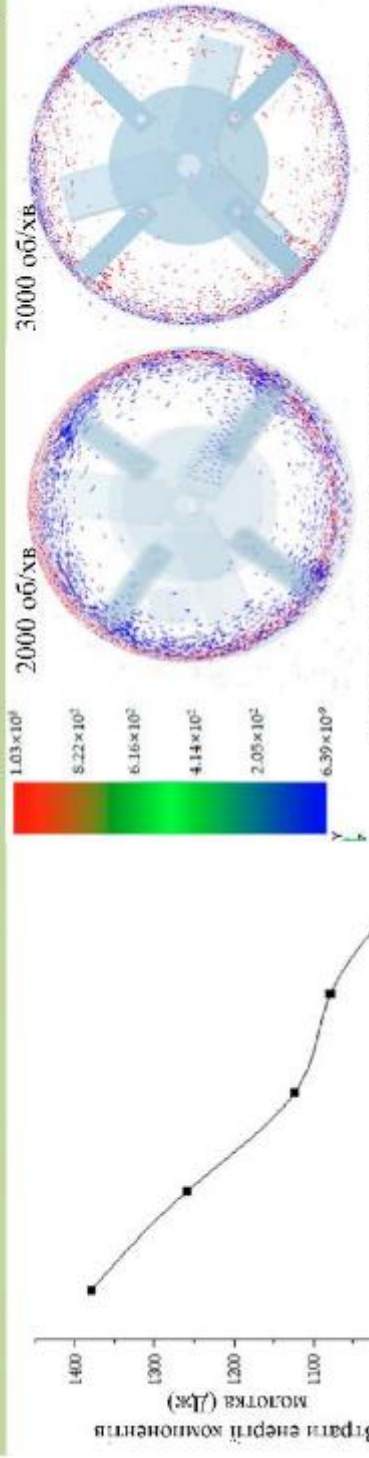


Результати зміни витрат енергії компонентів молотка при різних швидкостях обертання

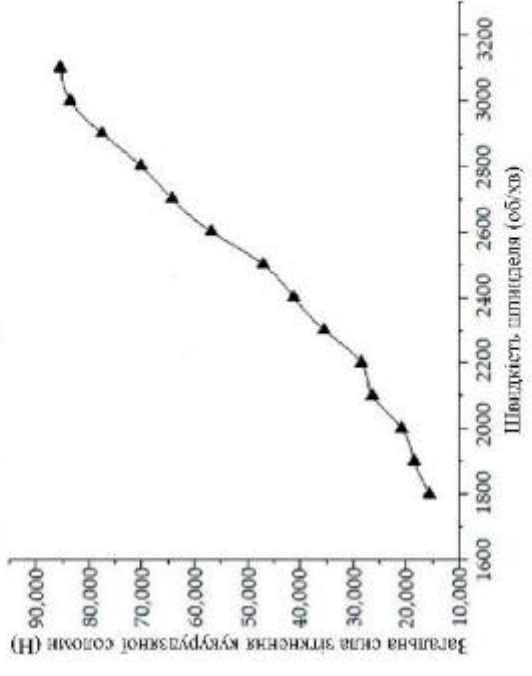


Результати зміни витрат енергії компонентів молотка в залежності від зазору між молотком і ситом

Результати чисельного моделювання процесу подрібнення стеблових кормів 8



Векторна діаграма сили зіткнення соломи при різних швидкостях обертання шпинделя



Результати чисельного моделювання зміни сили зіткнення соломи зі зміною швидкості обертання шпинделя

Результати втрат енергії компонентів молотка в залежності від зміни діаметра отворів сита

Щоб досягти максимальної ефективності роботи молоткової дробарки, у цьому дослідженні було використано функцію оптимізації для двоцільової оптимізації продуктивності на кВт·год (Z) та коефіцієнта подрібнення (S)

$$\begin{cases} \max Z \\ \max S \\ 2500 < A < 2700 \\ 12 < B < 16 \\ 6 < C < 10 \end{cases}$$

де A — швидкість обертання шпинделя (об/хв), B — зазор між молотком і ситом (мм), C — діаметр отвору сита (мм).

Вихідні дані

№	Показник	Розм.	CPS-420 (базовий варіант)	Новий варіант
1	Продуктивність	т/год	3,0	4,0
2	Максимальна споживана потужність	кВт	7	5
3	Вартість	грн.	150000	175000
4	Річне навантаження обладнання	т/рік	5000	5000

Зведена таблиця витрат

№	Показник	CPS-420 (базовий варіант), тис. грн.	Новий варіант, тис. грн.
1	Амортизаційні відрахування (A)	18	21
2	Витрати на ремонт (R)	19,5	22,75
3	Витрати на оплату праці (W)	162,67	122
4	Витрати на електроенергію (E)	199,5	142,5
5	Загальні витрати (З)	399,67	308,25

Річні експлуатаційні витрати

$$З_б = 18 + 19,5 + 162,67 + 199,5 = 399,67 \text{ тис. грн.}$$

$$З_н = 21 + 22,75 + 122 + 142,5 = 308,25 \text{ тис. грн.}$$

Економічний ефект

$$E = З_б - З_н = 399,67 - 308,25 = 91,42 \text{ тис. грн.}$$

Термін окупності

$$T = (ЦН - ЦБ) / E = (175 - 150) / 91,42 \approx 0,27 \text{ року}$$

1. В Україні спостерігається зниження темпів виробництва продукції тваринництва, зокрема через недостатню якість і кількість кормів, що обмежує реалізацію генетичного потенціалу тварин. Якість кормів є критично важливою для підвищення продуктивності тварин, оскільки вона складає до 70% собівартості виробництва. У світлі змін клімату та скорочення поєсів, необхідно впроваджувати інноваційні агрономічні стратегії та новітні технічні засоби для покращення виробництва кормів. Крім того, фізико-механічні властивості стеблових кормів мають велике значення для їх використання та обробки, і удосконалення цих характеристик сприятиме підвищенню ефективності тваринництва. Різноманітність технічних рішень для подрібноювачів стеблових кормів дозволяє агрономам оптимізувати процеси, знижувати енерговитрати і поліпшувати якість кормів, що є важливим кроком до сталого розвитку галузі.
2. Процес подріблення кукурудзяної соломи в молотковій дробарці є складною взаємодією між молотками, ситом і матеріалом, де важливими чинниками є маса і швидкість молотків, розміри ротора, зазор між молотком і ситом, а також опір повітря. Ефективність подріблення значно залежить від швидкості обертання шпинделя, лінійної швидкості молотків та характеристик руху соломи. Для оптимізації процесу подріблення важливо враховувати ці параметри, що дозволяє визначити оптимальні умови для підвищення ефективності та результативності обробки кукурудзяної соломи. Числові моделювання та експериментальні дослідження на основі цих чинників можуть сприяти подальшому вдосконаленню технології.
3. У дослідженні було успішно створено чисельні моделі молоткової дробарки та кукурудзяної соломи з використанням програмного забезпечення Simscale Star-CCM+, що дозволило досягти високої точності симуляцій завдяки оптимізації сітки з 5051110 елементів. Розроблена модель кукурудзяної соломи, що враховувала три типи часток, разом із використанням моделі Герца-Міллера для моделювання механіки контактів, відобразила реальні фізичні властивості часток. Налаштування параметрів симуляції забезпечило стабільність обчислень, а оцінка продуктивності молоткової дробарки відповідає національному стандарту, що дозволило ефективно аналізувати енерговитрати (кВт·год) та продуктивність подріблення. Це створило умови для подальшого вдосконалення процесів подріблення.
4. Чисельне моделювання процесу подріблення кукурудзяної соломи виявило, що збільшення швидкості обертання шпинделя призводить до більш швидкого руйнування часток зв'язків і підвищення ефективності подріблення. Оптимальні параметри для досягнення кращої ефективності включали швидкість обертання шпинделя 2625 об/хв, зазор між молотом і ситом 14 мм, та діаметр отворів сітки 8 мм, що забезпечило питомі енерговитрати 36,85 кВт/год і процент прохідності подріблення 76,56%. Валідаційні випробування підтвердили точність чисельного моделювання, оскільки отримані енергетичні витрати і сила зіткнення відповідали оптимальним значенням, що свідчить про ефективність та надійність застосованої моделі CFD-DEM для аналізу процесу подріблення.
5. Згідно з проведеними розрахунками, впровадження нового подрібноювача стеблових кормів забезпечує зниження річних експлуатаційних витрат на 91,42 тис. грн. у порівнянні з базовим варіантом CPS-420. Термін окупності нового обладнання становить приблизно 0,27 роки, що робить його економічно вигідним вибором для аграрного сектору.