

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

Пояснювальна записка
до дипломної роботи
освітнього ступеня "Магістр" на тему:
Чисельне моделювання вібраційного просіювача гранульованих кормів

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

_____ Коваленко Єгор Володимирович

Керівник: _____ Лупко Кристина Олегівна

Рецензент: _____ Луц Павло Михайлович

Дніпро, 2024

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

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

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

ІТС

(назва кафедри)

доцент

(вчене звання)

Дудін В.Ю.

(підпис)

(прізвище, ініціали)

«12» листопада 2024 р.

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

Коваленку Єгору Володимировичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи: Чисельне моделювання вібраційного просіювача гранульованих 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 взаємодії гранул корму. 3. Методика чисельного моделювання процесу роботи вібраційного просіювача гранульованих кормів. 4. Результат експериментальних досліджень процесу роботи вібраційного просіювача гранульованих кормів. 5. Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях. 6. Економічна ефективність вібраційного просіювача гранульованих 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 аркушів, А4). 4 Чисельне моделювання (4 аркуша, А4). 5. Економічні показники (1 аркуш, А4). 6. Висновки (1 аркуш, А4)

6. Консультанти розділів роботи

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

7. Дата видачі завдання: _____ 2024 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломного проєкту	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

_____ Коваленко Є. В.
(підпис) (прізвище та ініціали)

Керівник роботи

_____ Лупко К. О.
(підпис) (прізвище та ініціали)

[illegible]

Коваленко Є. В. Чисельне моделювання вібраційного просіювача гранульованих кормів. Випускна кваліфікаційна робота на здобуття освітнього ступеня «Магістр» за спеціальністю 208 «Агроінженерія». ДДАЕУ, Дніпро, 2024.

Ця робота присвячена дослідженню ефективності просіювання гранульованих кормів на вібраційних просіювачах. Основну увагу приділено аналізу конструкцій просіювачів, шляхам покращення їх технологічної продуктивності та використанню чисельних моделей для моделювання процесу просіювання. У першому розділі наводиться огляд сучасних методів підвищення ефективності виробництва продукції тваринництва та технологічного забезпечення виробництва гранульованих кормів. Проаналізовано конструкції та моделі просіювачів гранул, а також визначено мету і завдання дослідження. Другий розділ присвячений аналітичним дослідженням взаємодії гранул корму під час просіювання. Визначені критерії ефективності цього процесу, а також представлено фізико-математичний апарат моделювання. Третій розділ фокусується на чисельному моделюванні роботи вібраційних просіювачів. У четвертому розділі представлені результати експериментальних досліджень. П'ятий розділ охоплює аспекти охорони праці та безпеки в умовах експлуатації просіювачів, а шостий аналізує економічну ефективність використання даного обладнання. У висновках підсумовуються ключові результати досліджень, а також формулюються рекомендації щодо подальшого вдосконалення процесу просіювання.

Ключові слова: комбікорм, гранули, просіювач, вібрація, параметри, моделювання, ефективність.

Апробація. Коваленко Є. В. (2024). Чисельне моделювання вібраційного просіювача гранульованих 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, 149–151.

ЗМІСТ

ВСТУП	7
1 СТАН І НАПРЯМИ ДОСЛІДЖЕНЬ	8
1.1 Шляхи покращення ефективності виробництва продукції тваринництва	8
1.2 Технологічне забезпечення виробництва гранульованих кормів.....	9
1.3 Огляд конструкцій просіювачів гранул.....	12
1.4 Мета і завдання дослідження.....	16
1.5 Висновки з розділу	16
2 АНАЛІТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ВЗАЄМОДІЇ ГРАНУЛ КОРМУ	18
2.1 Постановка задачі	18
2.2 Критерії ефективності просіювання	22
2.3 Фізико-математичний апарат моделювання	24
2.4 Висновки з розділу	29
3 МЕТОДИКА ЧИСЕЛЬНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ РОБОТИ ВІБРАЦІЙНОГО ПРОСІЮВАЧА ГРАНУЛЬОВАНИХ КОРМІВ	30
3.1 Валідація моделі.....	30
3.2 Верифікація моделі.....	32
3.3 Висновки з розділу	36
4 РЕЗУЛЬТАТ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ПРОЦЕСУ РОБОТИ ВІБРАЦІЙНОГО ПРОСІЮВАЧА ГРАНУЛЬОВАНИХ КОРМІВ	38
4.1 Форми та матеріали отворів сита	38
4.2 Щільність матеріалу подачі	44
4.3 Зношення ситового полотна	47
4.4 Ефективність просіювання	51
4.5 Висновки з розділу	55
5 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ	56
6 ЕКОНОМІЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ ВІБРАЦІЙНОГО ПРОСІЮВАЧА ГРАНУЛЬОВАНИХ КОРМІВ	60
ВИСНОВКИ.....	62
Бібліографія	64
Додатки	69

ВСТУП

Організація Об'єднаних Націй з питань продовольства та сільського господарства вважає, що до 2050 року попит на продукти харчування зросте на 60%. Очікується, що у 2010–2050 роках виробництво тваринницької продукції зростатиме приблизно на 1,7% на рік. Крім того, прогнозується збільшення виробництва м'яса майже на 70%, молока на 55%, риби на 90%. Оскільки харчування людей залежить від якісного годування тварин, дуже важливо забезпечити сільськогосподарських тварин високоякісними комбікормами, щоб населення споживало якісні продукти тваринного походження. Кормова промисловість є одним із найбільш конкурентоспроможних секторів аграрного сектору. У 2023 році світове виробництво комбікормів склало приблизно 734,5 мільйона тонн комбікормів. Одним із найбільших виробників комбікормів в Азії є тайська компанія “Charoen Pokphand”, яка виробляє 18 мільйонів тонн комбікормів у різних частинах Східної Азії. США є одним із найбільших виробників комбікормів у 2019-2023 роках. Світове виробництво комбікормів забезпечує орієнтовний щорічний оборот понад 400 мільярдів доларів. Світове виробництво комбікормів у 2023 році досягло приблизно 1 мільярда тонн. Кормова промисловість, як і багато інших секторів харчової та переробної промисловості, зазнає значних змін. Незважаючи на загальне зростання виробництва комбікормів, спостерігаються структурні зміни в асортименті продукції, що були спричинені змінами у тваринництві та птахівництві.

Таким чином, розробка техніко-технологічного забезпечення виробництва гранульованих кормів є актуальною проблемою. Метою є підвищення ефективності техніко-технологічного забезпечення виробництва гранульованих кормів, шляхом удосконалення конструкції просіювача із обґрунтованими конструктивно-технологічними параметрами.

1 СТАН І НАПРЯМИ ДОСЛІДЖЕНЬ

1.1 Шляхи покращення ефективності виробництва продукції тваринництва

Тваринництво є ключовою галуззю аграрного виробництва, яка значною мірою впливає на продовольчу безпеку країни, рівень харчування та здоров'я населення. Наукові рекомендації щодо річної норми споживання продукції тваринництва на одну особу такі: молоко — 438 кг, м'ясо — 82 кг, яйця — 280 шт. Сьогодні лише виробництво харчових яєць на внутрішньому ринку може повністю забезпечити потребу населення, тоді як виробництво молока і м'яса різних видів покриває лише 60-80% науково обґрунтованого рівня споживання.

Одним з ключових факторів ефективності тваринництва є якість і доступність кормів. Нерідко корми не відповідають стандартам годівлі, що призводить до збільшення витрат на одиницю приросту живої маси. Втрата поживних речовин при заготівлі кормів може сягати 40-50 %. Відомо, що тварини перетворюють на продукцію лише 20-25 % енергії кормів, ще 25-35 % витрачається на фізіологічні потреби, а решта втрачається з відходами. Отже, ключовим завданням є зниження цих втрат шляхом підвищення засвоюваності кормів, що дозволяє покращити продуктивність тварин і зменшити собівартість продукції.

Корми займають найбільшу частку у структурі витрат на виробництво тваринницької продукції (рис. 1.1): у молочному виробництві це 40-45 %, у виробництві яловичини — до 73 %, свинини та птиці — понад 70 %. Вплив кормів на собівартість продукції залишається ключовим, і їх раціональне використання значно впливає на загальні виробничі витрати. Окрім кормів, витрати на паливно-мастильні матеріали та електроенергію також мають значний вплив на загальну собівартість продукції.

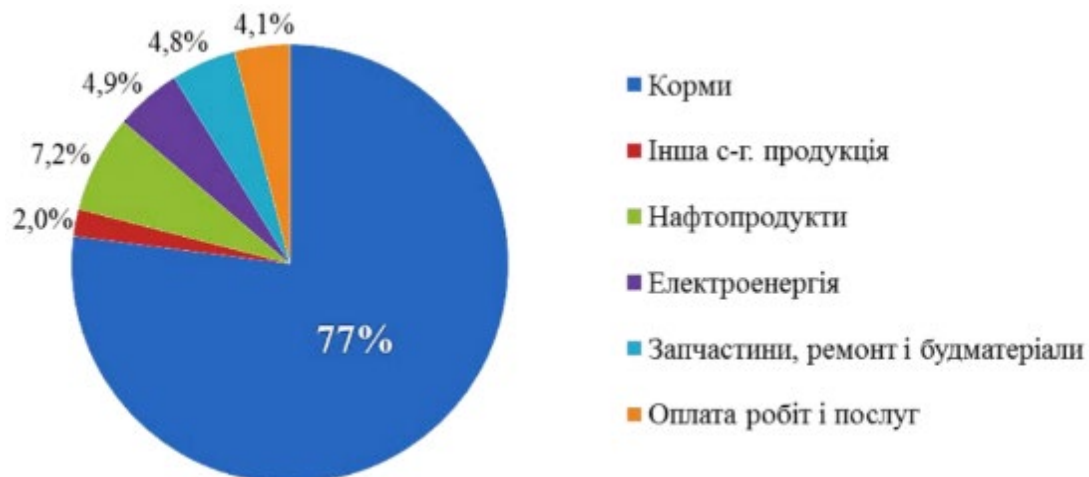


Рисунок 1.1 – Корми у структурі витрат на виробництво тваринницької продукції

У сучасних умовах велика увага приділяється раціонам годівлі, в яких зростає частка концентрованих кормів, особливо у свинарстві та птахівництві. За останні десятиліття частка соковитих кормів знизилась із 34 до 14 %, тоді як частка концентрованих кормів у раціонах зросла з 35 до 73 %. Ця тенденція відображає покращення раціонів, спрямованих на повнішу реалізацію генетичного потенціалу тварин, особливо у галузі молочного скотарства.

Основним шляхом підвищення ефективності є використання комбікормів, які забезпечують збалансованість раціонів. На сьогодні у тваринництві України використання комбікормів залишається на недостатньому рівні, хоча саме їх впровадження дозволяє підвищити продуктивність тварин та знизити собівартість продукції.

1.2 Технологічне забезпечення виробництва гранульованих кормів

Кормова промисловість України є досить важливою складовою агропромислового комплексу країни. Галузь забезпечує розвиток тваринництва та харчової промисловості. Підприємства кормової промисловості виробляють

корми, кормові концентрати, білково-вітамінні та білково-мінерально-вітамінні добавки, премікси та замінники цільного молока, а також інші кормові продукти. Кормова промисловість є досить перспективною завдяки наявності потужної сировинної бази в Україні, однак вона сильно залежить від стану тваринництва та птахівництва в країні. Лідерами виробництва комбікормів в Україні за 2017–2022 роки є Київська (25–30%), Черкаська (15–19%) та Дніпропетровська (12–15%) області. Лідерами ринку у 2017–2020 роках були такі підприємства, як «Катеринопільський елеватор», «Миронівський елеватор», «Комплекс Агромарс». Ринкова частка інших виробників кормів становить понад 60%. Важливим і невід'ємним процесом у виробництві комбікормів є процес гранулювання кормових продуктів. Гранульовані комбікорми мають кілька переваг перед сипучими комбікормами, які були описані вище. Однак, технологія гранулювання є однією з найбільш енергоємних та витратних процесів. У кормовій промисловості постає питання розробки методів, способів, режимів або технологій, які дозволять зменшити питомі витрати електроенергії при виробництві кормових продуктів. Одним із важливих напрямків для покращення процесу гранулювання є розробка нових технологій гранулювання із використанням існуючого обладнання, але зі зміною самої структури технології.

Традиційний процес виробництва комбікормів включає такі технологічні процеси (рисунк 1.1), як очищення компонентів зернової та білкової сировини, попереднє подрібнення компонентів, зважування та дозування, змішування готової суміші компонентів, отримання сипучих комбікормів. Сипучі комбікорми зволожуються з подальшим гранулюванням.

У гранулятор надходять сипучі комбікорми, в яких змішуються суміш і поживні речовини, мінерали, амінокислоти, олії та інші компоненти згідно з конкретним рецептом. Комбікорм проштовхується через отвори матриці гранулятора і виходить у вигляді гранульованого корму – гранул. Після гранулювання гранули охолоджуються. Далі гранули можуть бути подрібнені,

потім просіяні для отримання гранульованого крупного корму. Подрібнені продукти просіюються на індивідуальних ситах для контролю кількості продуктів. Спуск з верхнього сита спрямовується на повторне подрібнення.

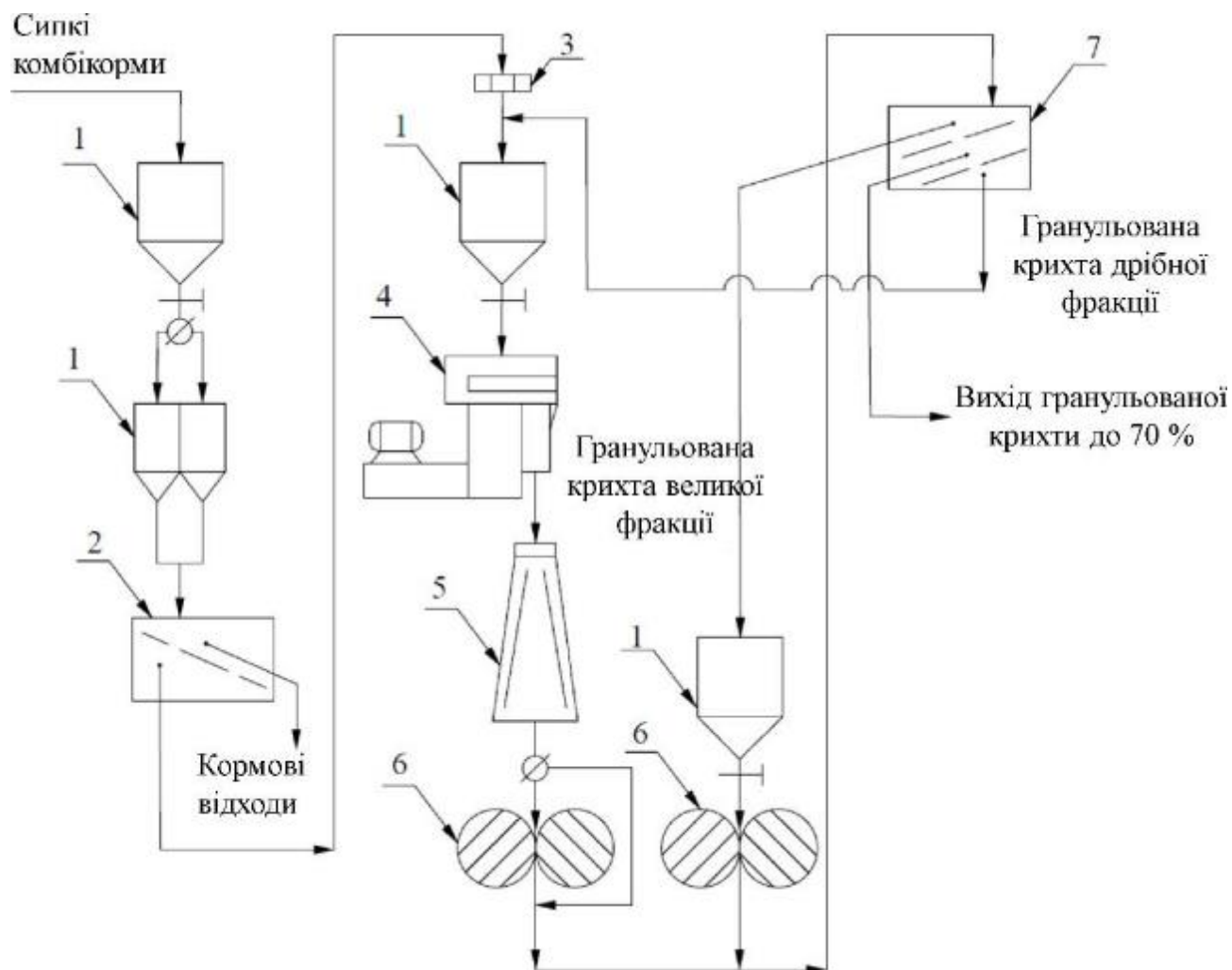


Рисунок 1.1 – Схема технології гранулювання змішаних кормів для отримання гранульованого крупного корму: 1 – бункер тимчасового зберігання; 2 – сепаратор для очищення; 3 – магнітний сепаратор; 4 – гранулятор; 5 – охолоджувач; 6 – дробарка; 7 – просіювач

Продукт, що проходить через сито, отримує борошнисту фракцію, яка направляється на повторне гранулювання. Продукт, який проходить через верхнє сито та сито, розташоване нижче, отримує гранульований крупний корм. Вихід

готової продукції (гранульованого крупного корму) не перевищує 70 %. Після проходження всіх етапів обробки, готовий гранульований корм у вигляді гранул або гранульованого крупного корму легко зберігається або упаковується у компактній формі.

1.3 Огляд конструкцій просіювачів гранул

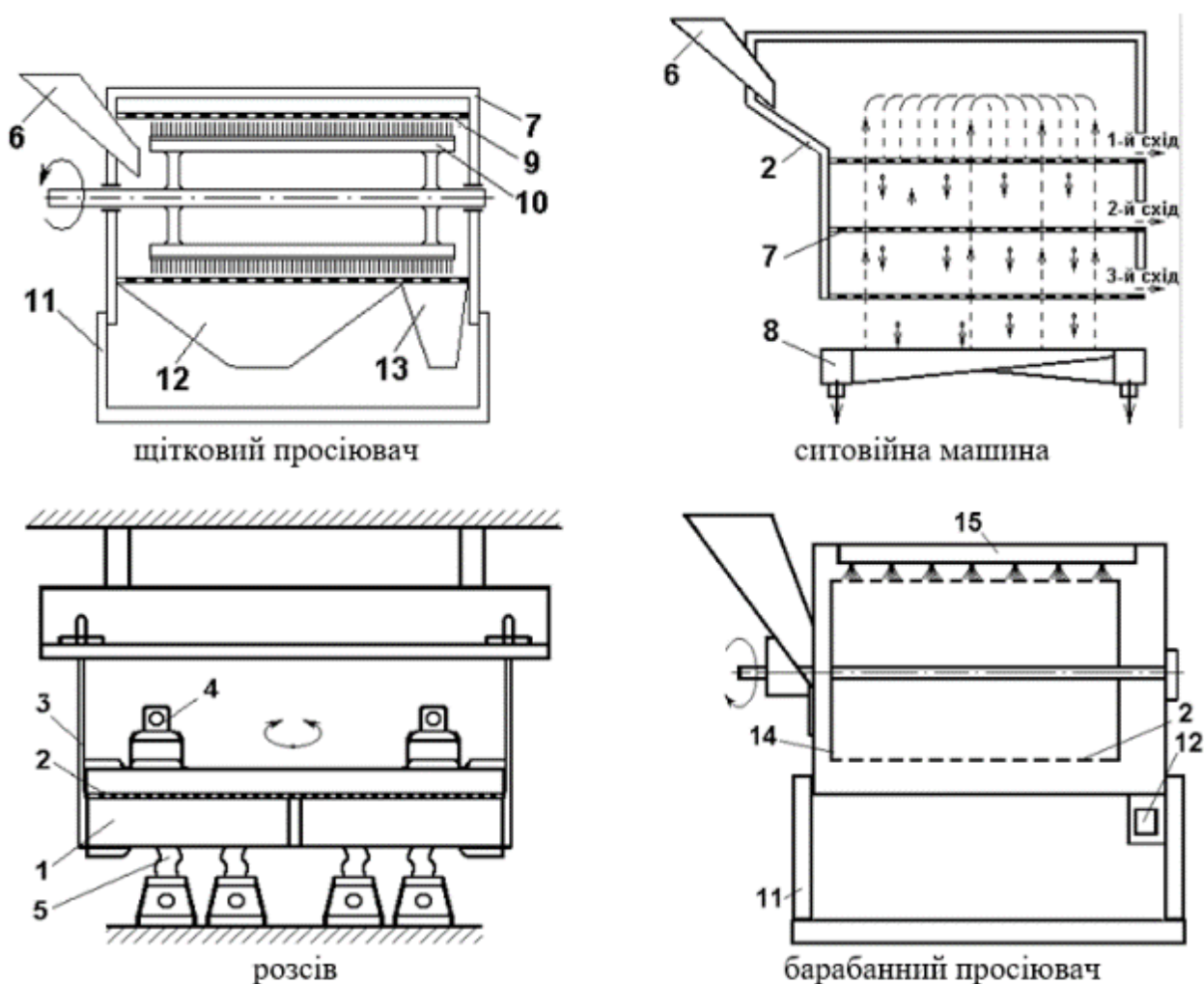
Процес підготовки гранульованих комбікормів включає досягнення оптимального розміру часток, що підходять для подальших технологічних операцій, як від додавання до грубих кормів з наступним перемішуванням інгредієнтів або їх безпосереднє використання у годівлі тварин.

Під час виробництва гранульованих кормів формуються частки різних розмірів, форм, щільності й аеродинамічних властивостей. Це відбувається через те, що гранули представляють собою сипку суміш, яка складається як з подрібнених, так і з цілих часток. Такий стан матеріалу дозволяє здійснювати його сортування та виділяти більш однорідні фракції.

Одним із найбільш поширених методів поділу сипких матеріалів є механічна сепарація. Цей процес здійснюється на спеціалізованих ситах, класифікація яких зображена на рисунку 1.2, і які ефективно використовуються для сортування гранульованих кормів.

Оцінюючи переваги та недоліки різного обладнання для сепарації, можна зробити висновок, що найкращим варіантом для просіювання гранульованих кормів є вібросита з решітним станом.

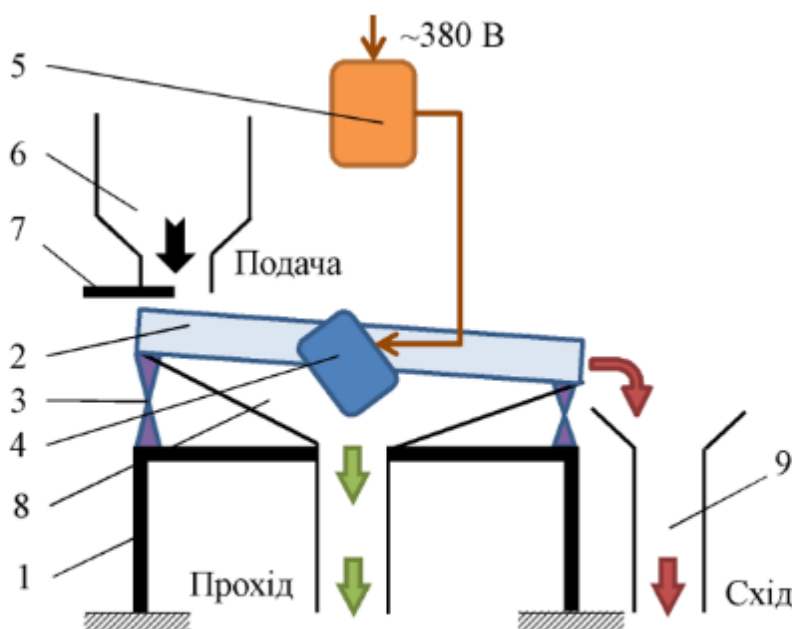
Вібросито для гранульованих комбікормів (рисунок 1.3) представляє собою конструкцію, що складається з рами 1, на якій встановлено решето 2 за допомогою пружин 3. До решета прикріплений вібродвигун 4, який підключений до частотного перетворювача 5. Над решетом розташований бункер 6 з регульованою заслінкою 7, а під ним – забірник проходу 8 та забірник сходу 9.



1 – ситова рама; 2 – сито; 3 – трос; 4 – приймальний рукав; 5 – випускний рукав; 6 – лійка
 7 – корпус; 8 – вивантажувальний короб; 9 – решето; 10 – щітковий барабан; 11 – рама;
 12 – вивантажувальне вікно; 13 – вивантажувальна горловина; 14 – барабан; 15 – щітка

Рисунок 1.2 – Класифікація конструктивних схем просіювачів гранул

Робота вібросити полягає в наступному: гранульовані корма подаються у бункер 6, і за допомогою заслінки 7 регулюється потік кормів на решето 2. Решето, установлене під певним кутом, починає вібрувати під дією вібродвигуна 4, частоту якого регулює частотний перетворювач 5. Менші за розміром гранули проходять крізь решето і потрапляють у забірник проходу 8, тоді як більші переміщуються до забірника сходу 9.



1 – рама; 2 – решето; 3 – пружина; 4 – вібродвигун; 5 – частотний перетворювач;
6 – бункер; 7 – регульована заслінка; 8 – забірник проходу; 9 – забірник сходу

Рисунок 1.3 – Конструкція вібропросіювача гранульованих комбікормів

Приклади вібраційних просіювачів — це похилі та горизонтальні вібраційні сита. Різниця між цими машинами полягає в тому, що у горизонтальних або майже горизонтальних ситах єдиною зовнішньою силою, яка підтримує транспортування матеріалу вздовж деки, є вібрація сита, що означає, що таке сито має меншу продуктивність, ніж похиле, де гравітація також допомагає переміщенню матеріалу до точки вивантаження. Звичайний нахил похилого просіювача становить від 15° до 25° (рис. 1.4).

Також використовується багатоярусне вібраційне сито для класифікації кількох фракцій, яке має різну кількість шарів дек. Зазвичай кількість дек варіюється від 4 до 6. Продуктивність такого сита не така велика, як у бананових та похилих сит, зважаючи на розмір сита. Також існують інші класифікаційні машини, такі як решітчасті та барабанні сита (Grizzly і Trommel), але вони менш поширені у видобувній промисловості порівняно з вібраційними ситами.

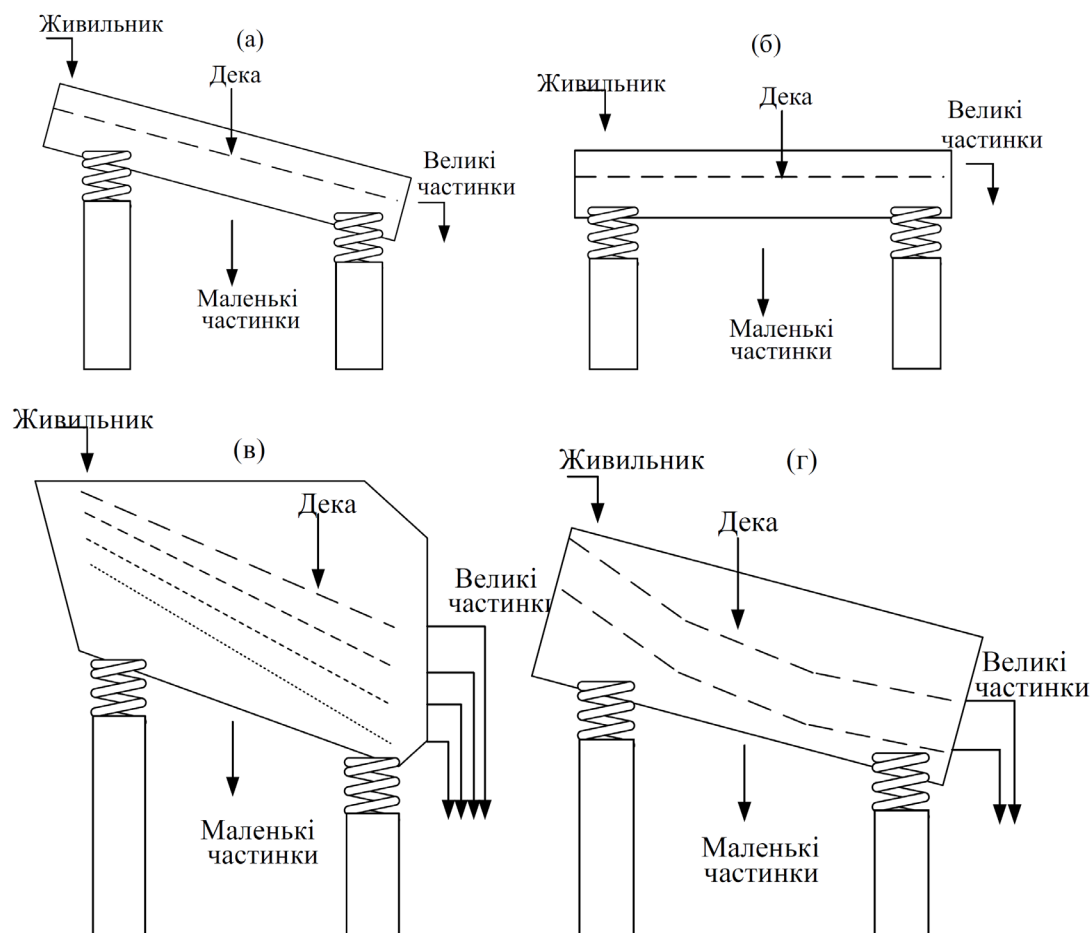


Рисунок 1.4 – Принципова діаграма чотирьох різних типів вібраційних просіювачів: а) похилий вібраційний просіювач, б) горизонтальний вібраційний просіювач, в) багатодоковий вібраційний просіювач, г) «банановий» просіювач

Загальні вигляди деяких вібраційних просіювачів наведено на рис. 1.5.



Рисунок 1.5 – Загальні вигляди деяких вібраційних просіювачів гранул

1.4 Мета і завдання дослідження

Метою є підвищення ефективності техніко-технологічного забезпечення виробництва гранульованих кормів, шляхом удосконалення конструкції просіювача із обґрунтованими конструктивно-технологічними параметрами.

Для досягнення цієї мети було поставлено такі завдання:

1. Провести аналіз сучасного стану та напрямів розвитку технологій виробництва гранульованих кормів, вивчити існуючі конструкції просіювачів та чисельні моделі процесу просіювання.

2. Розробити фізико-математичну модель процесу роботи вібраційного просіювача, визначивши критерії ефективності просіювання та апарат для моделювання.

3. Провести валідацію та верифікацію створеної моделі, оцінити її точність порівняно з експериментальними даними.

4. Виконати експериментальні дослідження процесу роботи вібраційного просіювача, оцінити вплив форми та матеріалу отворів сита, щільності матеріалу подачі та зношення ситового полотна на ефективність просіювання.

5. Провести оцінку економічної ефективності використання вібраційного просіювача, визначити основні економічні показники та виконати порівняльний аналіз з існуючими рішеннями.

6. Розробити заходи з охорони праці та безпеки в надзвичайних ситуаціях під час експлуатації вібраційного просіювача, оцінити ризики та запропонувати рекомендації для забезпечення безпечної роботи обладнання.

1.5 Висновки з розділу

1. Покращення ефективності виробництва продукції тваринництва досягається шляхом зниження втрат поживних речовин у кормах, підвищення

засвоюваності кормів та використання комбікормів, що сприяє зростанню продуктивності тварин та зменшенню собівартості продукції. Оскільки корми складають найбільшу частку у витратах на виробництво, раціональне їх використання є критичним фактором для підвищення загальної економічної ефективності галузі.

2. Підвищення ефективності виробництва гранульованих кормів вимагає розробки нових технологій гранулювання, які дозволять зменшити енерговитрати при використанні наявного обладнання. Оптимізація процесів, таких як зміна структури технології та вдосконалення стадій охолодження і просіювання, сприятиме підвищенню продуктивності, якості гранульованих кормів і зниженню питомих витрат виробництва.

3. Оптимізація процесу просіювання гранул у виробництві комбікормів досягається завдяки використанню вібраційних просіювачів, які ефективно розподіляють гранули за розмірами. Найбільш продуктивними є похилі вібросита, які, на відміну від горизонтальних, використовують силу гравітації для переміщення матеріалу. Використання багатоярусних вібраційних сит дозволяє отримувати кілька фракцій одночасно, що підвищує ефективність виробничого процесу та якість гранульованих кормів.

2 АНАЛІТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ВЗАЄМОДІЇ ГРАНУЛ КОРМУ

2.1 Постановка задачі

Процес просіювання є складним через велику кількість параметрів, які на нього впливають. Найвища можлива якість кінцевого продукту та ефективність процесу просіювання завжди є основними цілями як для виробників обладнання, так і для його користувачів.

Необхідно дослідити вплив різних параметрів на ефективність просіювання та вивчити, як ці параметри впливають на продуктивність процесу. Завдання цього дослідження полягає в розумінні роботи просіювального обладнання для кожного процесу та налаштуванні параметрів для досягнення найкращої якості продукту при максимальній ефективності. Для моделювання продуктивності просіювання гранул було використано метод дискретних елементів (DEM) за різних умов просіювання, щоб проаналізувати роботу процесу просіювання. Щоб визначити, чи є вихідні дані моделі симуляції прийнятними, було розроблено та збудовано лабораторне вібраційне сито для валідації симуляцій.

У цьому дослідженні було розглянуто принцип дизайну «один фактор за раз» (OFAT). Найважливішою перевагою використання OFAT є те, що помилка симуляції не є великою порівняно з ефектами факторів. Ще одне обмеження цього дослідження — виключення мокрого просіювання, яке складно виконати за допомогою DEM-симуляцій. Тому всі симуляції та дослідження були проведені для процесу сухого просіювання. DEM-симуляція може займати багато часу через всі дані про взаємодії між частинками та між частинками і геометрією, і саме тому частина симуляцій була виконана на лабораторному ситі, щоб зекономити час симуляції.

Основними компонентами вібраційного просіювача кормових гранул є дека сита, рама, вібраційний двигун або приводний механізм і пружини. Розподільник подачі також є частиною процесу просіювання, який має важливий вплив на ефективність, а найбільш поширеною машиною для подачі при просіюванні є стрічковий конвеєр. На основі всіх цих компонентів принцип роботи вібраційного просіювача полягає в тому, що рама монтується на пружинах, а вібрація передається на раму від неврівноваженої маси або двигунів-вібраторів.

На ефективність просіювання впливає кілька різних параметрів, які поділяються на параметри машини та процесу. Параметри процесу включають характеристики продукту та матеріал подачі. На рисунку 2.1 показано загальний вигляд основних елементів просіювання.

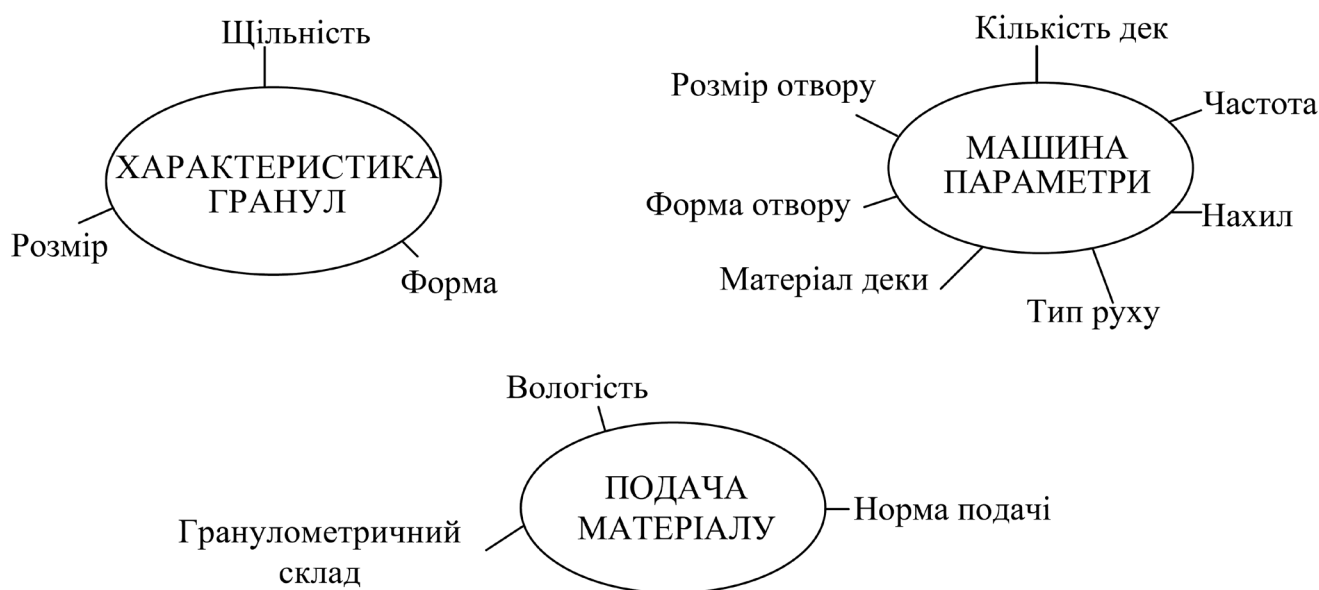


Рисунок 2.1 – Основні елементи дослідження

Вібраційні сита мають різні типи руху, які залежать від нахилу деки сита; круговий рух разом із нахилом сита призводить до перевертання матеріалу під час його переміщення по деці. Перевертання допомагає запобігти застрягання матеріалу у отворах і дає можливість меншим частинкам перейти з верхнього

шару матеріалу на поверхню деки. Стратифікація працює краще, якщо на ситі є нахил, щоб суміш гранул могла пересуватися вздовж деки під дією сили тяжіння.

На горизонтальному вібраційному ситі нахил майже відсутній. Лінійний рух передає зворотно-поступальну дію з певною амплітудою під кутом до вертикалі. Тому дека сита піднімає матеріал, а потім віддаляється від нього, що переносить матеріал по ситі.

Інший тип руху — це еліптичний рух, який є комбінацією кругового та лінійного руху. Еліптичний рух можна використовувати як у горизонтальних ситах, так і в ситах з більш високим ступенем нахилу. Різні типи руху сит показано на рисунку 2.2.

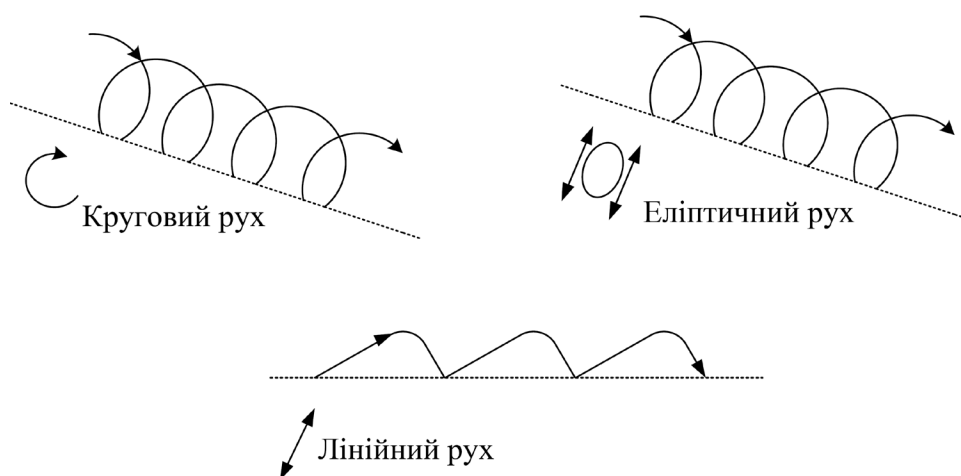


Рисунок 2.2 – Схематичне зображення різних типів руху

Швидкість подачі гранульованого корму і розмір вібраційного сита є двома іншими параметрами, які впливають на вибір типу руху сита. Поєднання цих двох параметрів формує товщину шару матеріалу. Це означає, що якщо шар матеріалу є одношаровим, то його не потрібно перевертати, тому навіть вібраційне сито з більшим нахилом може мати лінійний рух.

Кількість дек вібраційного сита залежить від вимог до кінцевих продуктів. Вібраційне сито з двома деками має три різних кінцевих продукти: вивантаження

продукту з верхньої та нижньої дек, а також продукт, який проходить через нижню деку. Розмір і форма отворів, а також матеріал панелей сита, що утворюють деку, варіюються в різних ситах і для різних застосувань. Можливо навіть використовувати різні типи дек на одному ситі.

Вибір правильної деки сита для кожного процесу просіювання є одним із ключових факторів максимізації ефективності просіювання. Існує два основних типи дек: одна — це панель, виготовлена з гуми або поліуретану, а інша — дротяне полотно, яке зазвичай виготовляється зі сталі.

Для процесів просіювання з високою швидкістю подачі панельні деки дуже популярні. Як гумові, так і поліуретанові матеріали мають відмінну зносостійкість, хоча гуму в основному використовують для сухого просіювання, а поліуретан зазвичай обирають для мокрих застосувань. Для монтажу панелі збирають на підраму кожної деки сита, що дозволяє використовувати різні панелі на одній деці. Є варіації у формі отворів панельної деки, найпоширеніші з них — прямокутні та квадратні, інші — круглі, восьмикутні та шестикутні.

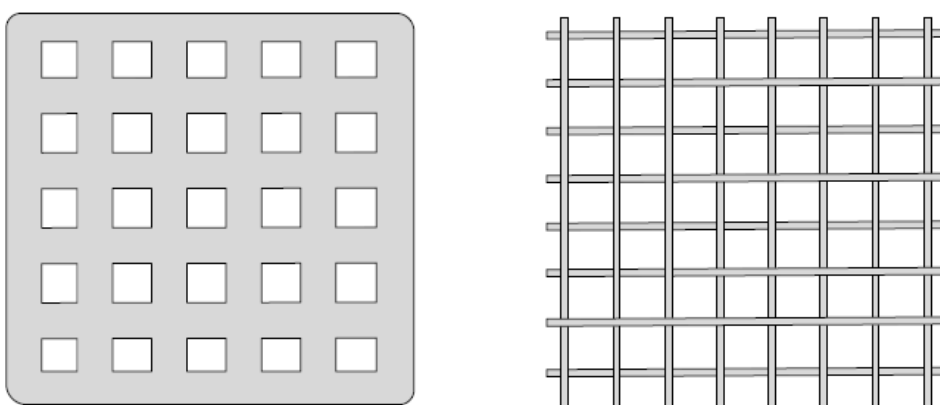


Рисунок 2.3 – Ілюстрація схематичного вигляду панелі (ліворуч) і дротяної сітки (праворуч)

Дротяне полотно є найдешевшим типом деки, з перевагою великої відкритої площі, і воно є відносно легким порівняно з панельною декою. Велика відкрита

площа зазвичай дозволяє зробити сито меншим, ніж сито з модульними панелями для досягнення тієї ж очікуваної продуктивності. Збільшення товщини дроту підвищує міцність, але зменшує відкриту площу, а отже, і продуктивність. На рисунку 2.3 показані різні типи дек сит.

Вібраційний двигун або приводний механізм забезпечує вібрацію сита. Залежно від жорсткості пружин, маси рами сита та дек, частота зазвичай становить від 12 до 20 Гц. Типова амплітуда для вібраційних сит становить від 10 мм до 14 мм.

2.2 Критерії ефективності просіювання

Попередні дослідження вивчали моделювання процесу просіювання, прагнучи передбачити модель просіювання для кращого розуміння цього процесу та підвищення його ефективності.

Існують різні визначення ефективності просіювання, найпростішим з яких є визначення того, наскільки ефективно просіювання у сталому стані призводить до варіації маси частинок, що проходять через сито, вздовж його довжини. Згідно з Віллсом та Фінчем (2016), найпоширенішим методом розрахунку ефективності є визначення виходу кінцевого продукту у дрібну фракцію. Це означає, що ефективність просіювання — це відношення дрібного матеріалу у вихідній сировині, що фактично проходить через сито, до дрібного матеріалу, який мав би пройти через сито. Ефективність визначається рівнянням (2.1), яке представляє ефективність для дрібних частинок, де e — це відсоток дрібного матеріалу у вихідній сировині, а v — це відсоток дрібного матеріалу у відсіяному продукті. Якщо основну увагу приділяють великим частинкам, то вихід великих частинок у відсіяному продукті буде розраховуватись за рівнянням (2.2), де O — масовий потік великого продукту, а F — масовий потік вихідного матеріалу до сита.

$$E_U = \frac{e - v}{e(1 - v)} \quad (2.1)$$

$$E_O = \frac{O(1 - v)}{F(1 - e)} \quad (2.2)$$

Існує кілька методів розрахунку для прогнозування ефективності просіювання. Багато досліджень у минулому призвели до розробки емпіричних моделей просіювання для прогнозування функцій класифікації за розмірами частинок. Один з таких методів — метод Карри, який дійсний лише для щілинних отворів більших за 1 мм (Karra, 1979). Модель Карри описує, як сито може працювати за різних умов експлуатації. Модель базується на потужності сита, на яку впливає частка дрібного матеріалу у вихідній сировині. Фактори, які впливають на потужність сита, це стандартні умови сита та вихідного матеріалу. Згідно з Каррою (1979), теоретична кількість дрібного матеріалу, який може бути переданий ситом, може бути розрахована за формулою:

$$K = ABCDEFG \times \text{screen area} \quad (2.3)$$

У рівнянні (2.3) фактори А, В і С — це потужність, яка визначається кількістю дрібного, великого та напіврозмірного матеріалу у вихідній сировині відповідно, а D — місце розташування сита. Фактор Е — це фактор просіювання вологого матеріалу, F — це густина матеріалу. Фактор G — це коефіцієнт потужності, пов'язаний із матеріалом, який близький за розміром до отворів сита, і який має суттєвий вплив на ефективність просіювання. Якщо значення К майже дорівнює кількості дрібного матеріалу у вихідній сировині, це означає, що сито добре або правильно спроектоване.

Одним із досліджень, у якому модель Карри була використана як модель сита, було дослідження Котабаррена та ін. (2009), які показали, що результати моделі Карри як емпіричного підходу мають велику простоту та високу

ефективність, оскільки їй вдається точно передбачити всі експериментальні дані. У цьому дослідженні модель Карри застосовували до вібраційного сита.

2.3 Фізико-математичний апарат моделювання

Процес розробки інженерних продуктів та систем часто включає тестування для оцінки їхньої надійності. У багатьох випадках продукти та системи можуть бути розроблені для тривалого терміну служби та високої надійності, і експерименти можуть бути дорогими для складних систем. Одна зі стратегій, яка може бути використана для прискорення процесу розробки та зниження витрат на розробку продукту, – це використання комп'ютерних моделей симуляції.

Метод дискретних елементів (DEM) є спеціальним класом числових схем для моделювання поведінки частинок і взаємодіючих тіл. Процес аналізу складається з трьох основних обчислювальних етапів: оцінки внутрішньої сили, в якій розраховуються контактні сили; інтеграції рівнянь руху, де обчислюються зміщення елементів; і виявлення контакту, де нові контакти ідентифікуються, а старі видаляються. У DEM-аналізі взаємодія елементів розглядається як динамічний процес, який чергується між застосуванням другого закону Ньютона і оцінкою закону сили–зміщення у контактах (Tavarez and Plesha, 2007).

Основний принцип DEM базується на алгоритмах виявлення контактів та застосуванні відповідної контактної моделі залежно від вимог. У алгоритмі виявлення контактів розглядаються три різні елементи: прискорення, швидкість та положення. Для контактної моделі головними елементами є сила і контакт. Взаємозв'язок між цими елементами показаний на рисунку 2.4. Частинки можуть мати різні форми, хоча найчастіше їх вважають круглими або сферичними через простоту та швидкість алгоритму виявлення контактів. Важливою частиною симуляції DEM є визначення частинок, яке можна зробити двома способами. Один варіант – це визначити частинки шляхом імпорту моделі з бібліотеки DEM, де

частинки згруповані за кількістю сфер і форм. Другий спосіб – налаштувати їх форму і розмір за допомогою системи координат.

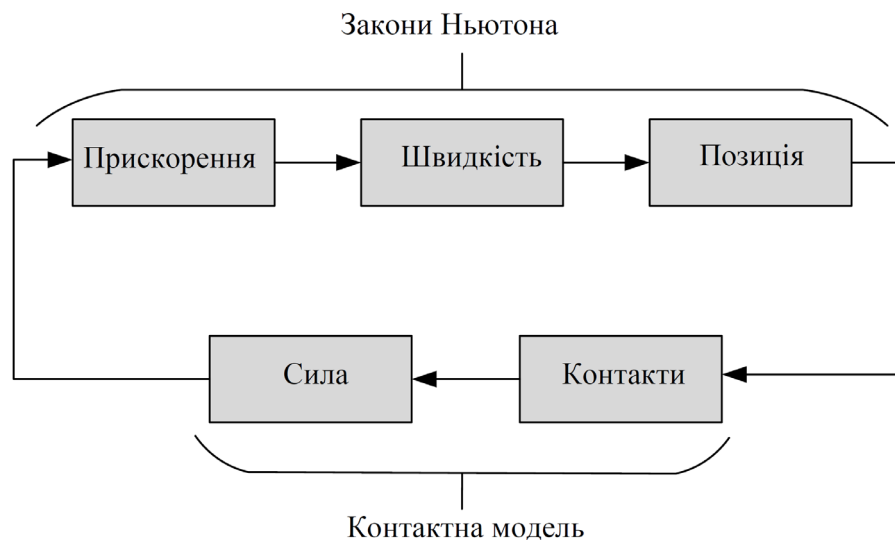


Рисунок 2.4 – Основний принцип DEM

Після визначення частинок наступним етапом є вибір контактної моделі для взаємодії частинка-частинка і частинка-геометрія. У симуляціях DEM існують два типи основних контактних моделей: лінійно-еластична модель та нелінійно-еластична модель. Лінійно-еластичні моделі можна просто уявити як пружину, тоді як нелінійна нормальна еластична модель зазвичай стосується моделі Герца, яка є більш складною. Недолік лінійної контактної моделі полягає в тому, що форма частинок не є достатньо точною для обчислень.

Проста лінійна модель контакту містить силу і зміщення, де збільшення контактної сили лінійно пов'язане зі збільшенням зміщення. Контактну силу можна розрахувати за рівнянням (2.4).

$$\vec{F}_i^n = -K^n \vec{U}^n \quad (2.4)$$

де K^n – жорсткість на нормаль, U^n – нормальне перекриття зміщення, а $\vec{n}_i$ – одиничний вектор, напрямок якого збігається з напрямком перекриття зміщення. Лінійно-еластична контактна модель є простою та ефективною моделлю контакту з досить високою ефективністю і частіше використовується, ніж модель Герца-

Міндліна. Це пояснюється тим, що в більшості симуляцій основним фактором є еластичні властивості. Проте, у симуляціях, де форма частинок суттєво впливає на точність симуляції, модель Герца-Міндліна є кращим варіантом.

Модель контакту Герца-Міндліна є безковзною моделлю, яка використовує модель пружини та демпфера (Just et al., 2013). На рисунку 2.5 показано взаємодію між двома частинками з фрикційним елементом між нормальною силою та дотичною силою.

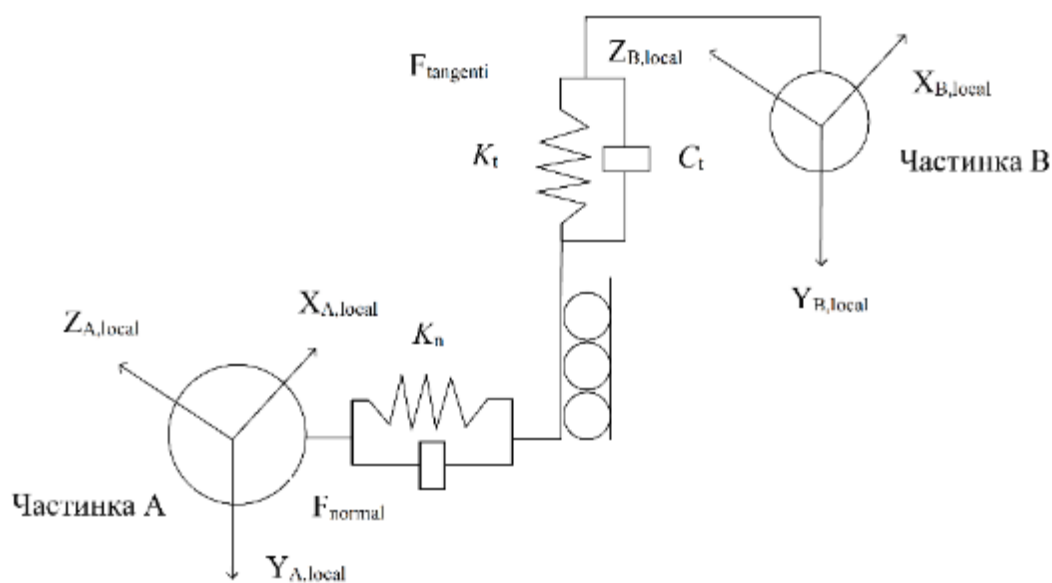


Рисунок 2.5 – Графічне зображення моделі контакту Герца-Міндліна

Модель контактної сили Герца-Міндліна базується на нормальній і дотичній силах між частинками. Нормальна сила заснована на контактній теорії Герца, а дотична сила – на моделі Міндліна-Дересієвича (Keer et al., 1991). Нормальна сила F_n має два компоненти: силу пружини і демпфіруючу силу. Дотична сила F_t також має два компоненти: силу зсуву і демпфіруючу силу (Just et al., 2013; Maw et al., 1976). Нормальну та дотичну сили можна розрахувати за рівняннями (2.5) і (2.6).

$$F_n = -K_n \Delta x + C_n V_n \quad (2.5)$$

де K_n – еластична постійна для нормального контакту, Δx – відстань між двома частинками, C_n – в'язкоеластична демпфіруюча постійна для нормального контакту, а V_n – нормальна швидкість частинок.

$$F_t = -K_t \Delta x + C_t V_t \quad (2.6)$$

де K_t – еластична постійна для дотичного контакту, Δx – вектор дотичного зміщення між двома сферичними частинками, C_t – в'язкоеластична демпфіруюча постійна для нормального контакту, а V_t – дотична швидкість частинок.

У моделі контакту Герца-Міндліна еластичні константи K_n та K_t розраховуються на основі властивостей матеріалу за рівняннями (2.7) та (2.8).

$$K_n = 2E^* \sqrt{R^* U_n} \quad (2.7)$$

$$K_t = 8G^* \sqrt{R^* U_n} \quad (2.8)$$

де модуль Юнга E , еквівалентний радіус R , нормальне перекриття U_n , еквівалентний модуль зсуву G , еквівалентна маса m , в'язкоеластична демпфіруюча постійна для нормального контакту C , радіуси частинок R_1 і R_2 , а також маси частинок m_1 і m_2 визначаються за рівняннями (2.9)-(2.12):

$$\frac{1}{E^*} = \frac{1 - \nu_1^2}{E_1} + \frac{1 - \nu_2^2}{E_2} \quad (2.9)$$

$$\frac{1}{R^*} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \quad (2.10)$$

$$\frac{1}{m^*} = \frac{1}{m_1} + \frac{1}{m_2} \quad (2.11)$$

$$C = \frac{1}{\sqrt{\ln^2(e) + \pi^2}} \quad (2.12)$$

Визначення частинок є важливим кроком для симуляції DEM через вплив таких властивостей, як форма частинок і щільність, на ефективність сортування. Залежно від цілей кожного дослідження, використовувалися частинки з визначеними користувачем діаметрами для відповідності запланованим симуляціям. Усі частинки були несферичними, оскільки дуже різні результати

отримуються при використанні однієї сферичної частинки порівняно з багатосферичними частинками. Багатосферичні частинки дають більш реалістичні результати, оскільки ці форми частинок ближчі до реальних. На рисунку 2.6 показано приклад деяких форм частинок, які використовувалися в симуляціях, де всі сфери мали однакові матеріальні властивості.

Характеристики частинок варіюються в різних симуляціях, але якщо частинки використовуються для процесу сортування, а не для руйнування, то наявність руйнівних частинок не є критичною, що дозволяє заощадити час на обчислення.

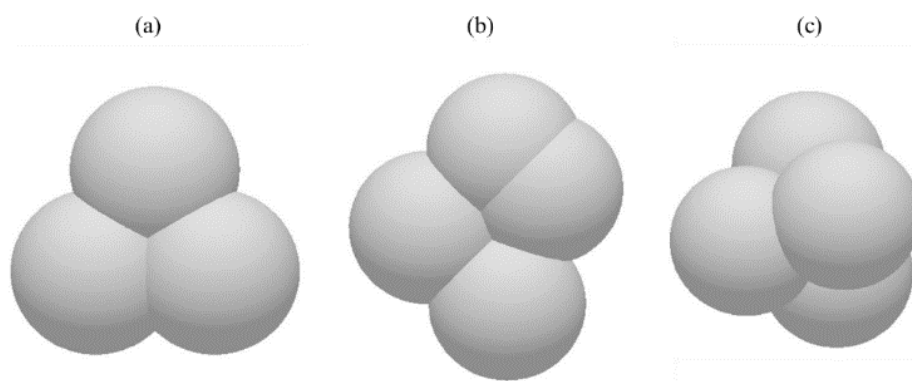


Рисунок 2.6 – Приклад моделювання форми частинок з (а) трьома сферами, (б) чотирма сферами і (в) п'ятьма сферами

Що стосується характеристик частинок, деякі параметри необхідно модифікувати для кожної симуляції, оскільки ці параметри впливають на тертя між частинками, а також на параметри контактної моделі. У таблиці 2.1 наведено підсумок цих параметрів, які використовувалися для всіх симуляцій. Коефіцієнт відновлення між частинками становить 0,2, а між частинками та екраном – 0,6. Коефіцієнт статичного тертя для зіткнення частинка-частинка становить 0,6 (Atkins, 2013). Модуль зсуву для частинки становить 24 МПа, а для екрану – 79 ГПа. Коефіцієнт Пуассона для частинок дорівнює 0,3, а для екрану – 0,2 (Oxford, 2020).

Таблиця 2.1 – Параметри симуляції

Властивості матеріалу	Коефіцієнт Пуассона	Модуль зсуву	Щільність
Частинки	0,3	24 МПа	2500 кг/м ³
Екран (Сталь)	0,2	79 ГПа	7800 кг/м ³
Властивості зіткнення	Коефіцієнт відновлення	Коефіцієнт статичного тертя	Коефіцієнт кочення
Частинка-частинка	0,2	0,6	0,01
Частинка-екран (Сталь)	0,6	0,45	0,01

2.4 Висновки з розділу

1. Процес просіювання є багатофакторним і вимагає детального аналізу впливу різних параметрів для досягнення високої якості кінцевого продукту та ефективності процесу. Важливою частиною дослідження є використання DEM-симуляцій та лабораторних випробувань, що дозволяють оцінити роботу просіювального обладнання та оптимізувати параметри для максимізації продуктивності.

2. Ефективність процесу просіювання визначається здатністю сита відокремлювати частинки різних розмірів з максимальною точністю. Одним із поширених підходів є використання моделі Карри, яка враховує різні фактори, такі як розмір частинок, густина матеріалу та умови просіювання. Висока точність цієї моделі підтверджена емпіричними дослідженнями, що дозволяє ефективно прогнозувати результати просіювання та оптимізувати процес для підвищення продуктивності.

3. Фізико-математичне моделювання процесів просіювання є ефективним інструментом для аналізу складних систем. Метод дискретних елементів (DEM) дозволяє моделювати поведінку частинок та їх взаємодію на мікрорівні, враховуючи такі фактори, як форма, щільність та контактні сили. Лінійно-еластичні та нелінійно-еластичні моделі використовуються для симуляцій залежно від точності та складності процесу. Правильне налаштування параметрів частинок, таких як модуль зсуву, коефіцієнти тертя та відновлення, є критичним для отримання точних результатів симуляцій, що дозволяє оптимізувати процеси просіювання та сортування матеріалів.

3 МЕТОДИКА ЧИСЕЛЬНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ РОБОТИ ВІБРАЦІЙНОГО ПРОСІЮВАЧА ГРАНУЛЬОВАНИХ КОРМІВ

3.1 Валідація моделі

Валідація моделі – це процес кількісної оцінки відповідності між передбаченнями моделі та експериментальними даними з метою гарантувати, що прогножуюча модель може добре представляти фактичну фізичну систему. Для досягнення прийнятної валідності необхідно провести низку експериментів.

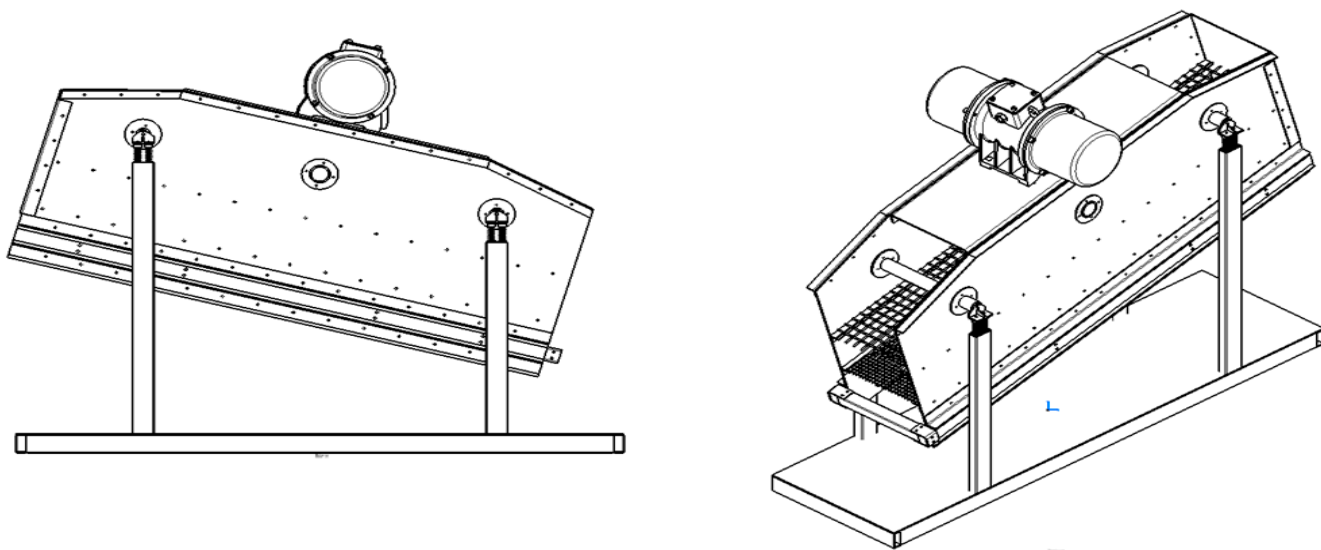


Рисунок 3.1 – Вигляд CAD моделі лабораторного екрана

Лабораторні експерименти забезпечують економічно ефективний спосіб кількісної оцінки процесів і визначення меж валідності теорії. Дослідження різних параметрів у повномасштабних експериментах зазвичай є дорогим і здебільшого складним через неможливість регулювання промислових повномасштабних машин. Тому було спроектовано та побудовано спеціально розроблений лабораторний вібраційний просіювач, який дозволяє спостерігати за рухом частинок під час процесу просіювання та забезпечує точний контроль параметрів

просіювання. На рисунку 3.1 показано модель лабораторного просіювача, використану в експерименті, та схеми моделі, використаної в симуляціях, а на рисунку 3.2 – фото лабораторного просіювача, використаного в експериментах.



Рисунок 3.2 – Фотографія лабораторної моделі екрана, яка використовується в експериментах

Просіювач має два яруси, що дозволяє розділяти частинки на продукт надрешітний, який виводиться з кінця верхнього та нижнього ярусів, і підрешітний продукт, який проходить через отвори верхнього та нижнього ярусів. На рисунку 3.3 показано форму отворів та масштаб для верхнього і нижнього ярусів.

Зведення експлуатаційних і геометричних параметрів наведено в таблиці 3.1. Тип руху – лінійний, і амплітуда просіювача може регулюватися шляхом зміни кута між двома ексцентричними неврівноваженими блоками у вібраційному двигуні або зміною частоти двигунів за допомогою частотного перетворювача. Інші параметри, які можна регулювати, це розмір і форма отворів, змінюючи яруси. Подача може регулюватися товщиною шару та швидкістю подаючого конвеєра.

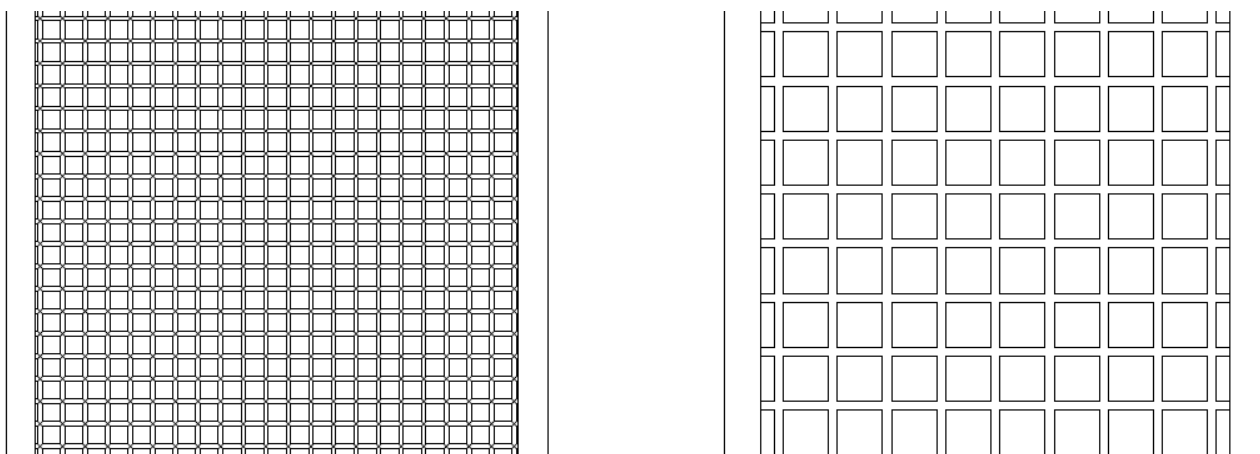


Рисунок 3.3 – Форма отворів для верхнього ярусу (праворуч) і нижнього ярусу (ліворуч)

Таблиця 2. Геометричні та експлуатаційні параметри лабораторного просіювача

Параметри	Значення
Довжина просіювача	1500 мм
Ширина просіювача	300 мм
Розмір отворів	10 x 10 – 25 x 25 мм
Діаметр дроту	2,5 мм
Матеріал ярусів	Сталь
Нахил	15°
Амплітуда	1,5 до 9,5 мм
Рух вібрації	Лінійний

3.2 Верифікація моделі

У ході цього дослідження було відібрано різні параметри просіювання для дослідження за допомогою DEM (методу дискретних елементів) з метою аналізу поведінки частинок під час просіювання. Для характеристики матеріалу було вивчено щільність частинок, щоб зрозуміти вплив щільності на стратифікацію та швидкість проходження.

Було досліджено деякі параметри машини, такі як тип руху робочої поверхні просіювача, щоб зрозуміти, як зміна типу руху впливає на переміщення частинок по

поверхні. Також було досліджено три різні матеріали для робочої поверхні: гуму, поліуретан та дротяну сітку. Основною метою цього дослідження є вивчення впливу відкритої площі на проходження частинок та впливу матеріалу просіювальної поверхні на рух частинок.

Однією з проблем, що виникає під час просіювання, є знос робочої поверхні. Знос змінює розмір і геометрію отворів, що знижує якість продукції і часто зменшує ефективність використання просіювача, що призводить до втрат у виробництві через необхідність зупиняти процес для заміни просіювальної поверхні. Різні розрахунки зносу поверхні були зроблені за допомогою різних моделей.

Для валідації моделі DEM для процесу просіювання було побудовано лабораторний вібраційний просіювач. Основна мета – визначити, наскільки точними є симуляції порівняно з реальними випробуваннями. Ті ж самі умови були налаштовані як у симуляціях, так і в експериментах. DEM використовується як симуляційна платформа для відстеження частинок та їх взаємодій, що робить її придатною для моделювання процесу просіювання за різних умов.

У роботі використовується DEM для аналізу різних типів рухів, зосереджуючись на факторі амплітуди при еліптичному русі. При зменшенні амплітуди еліптичного руху різні секції бананового просіювача по-різному реагують залежно від процесу просіювання. Тип руху менше впливає на секції, де основний ефект має процес проходження або вільного падіння. У секціях із більшою товщиною шару матеріалу стратифікація стає важливим чинником, і в цих секціях еліптичний рух має сильніший вплив на процес стратифікації.

У цій роботі моделювалися три різні типи руху. Перша симуляція була з еліптичним рухом з амплітудою 6 мм. Друга симуляція використовувала еліптичний рух з амплітудою 3 мм, а третя — з амплітудою 1 мм. Усі три рухи мали однакову амплітуду в ортогональному напрямку, яка становила 14 мм. Метою зменшення амплітуди було наближення до лінійного руху, водночас досліджуючи вплив амплітуди на ефективність просіювання. На рисунку 3.4 показано амплітуди, використані в симуляціях.

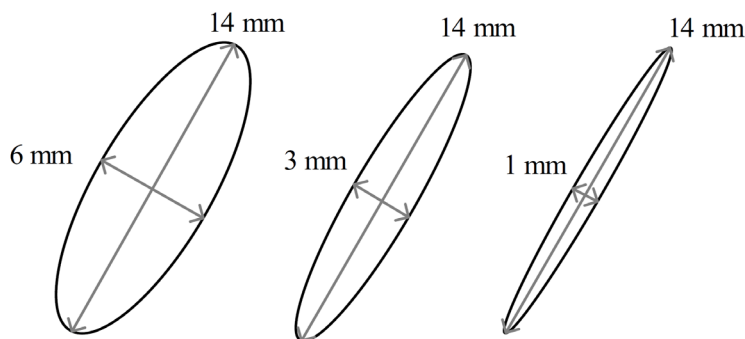


Рисунок 3.4 – Зображення різних амплітуд, використаних у симуляціях з еліптичним рухом. Зліва направо: 6 мм, 3 мм і 1 мм

Було виконано три симуляції просіювача, що має форму банана. У цих симуляціях ефективність просіювача аналізувалася шляхом зміни типу руху як однієї з умов симуляції. Для симуляцій були створені геометричні бункери для експорту даних. Кожна секція мала один геометричний бункер. Схематичне зображення робочої поверхні та бункерів показано на рисунку 3.5.

Частинки зберігалися в симуляції, поки процес не досягав стаціонарного стану (Cleary, Sinnott та ін., 2009). Це означає, що кількість частинок у симуляції залишалася стабільною. У цьому дослідженні стаціонарні умови були досягнуті в усіх трьох симуляціях через 10 секунд.

Загальна кількість частинок вивчалася шляхом порівняння кількості частинок, які пройшли через кожен бункер у всіх трьох симуляціях. Результати показують, що кількість частинок у бункері 1 у всіх симуляціях була дуже схожою. Бункер 1 і бункер 4 розташовані під точкою подачі просіювача; отже, гравітація була важливим чинником, що впливав на проходження частинок, через що ефект проходження був більшим, ніж ефект стратифікації в секції 1.

Кількість частинок, що пройшли секцію 2 у всіх симуляціях, була більшою, ніж у секції 1, оскільки стратифікація стала важливішим чинником у секції 2 верхньої робочої поверхні. Результати показують, що зменшення амплітуди еліптичного руху негативно вплинуло на ефективність просіювання. У бункері 5

секції 2 ефект проходження був більшим, ніж ефект стратифікації через вільне падіння. Через менший кут нахилу робочої поверхні в бункерах 3 і 6 матеріал накопичувався, і процес стратифікації ставав важливішим.

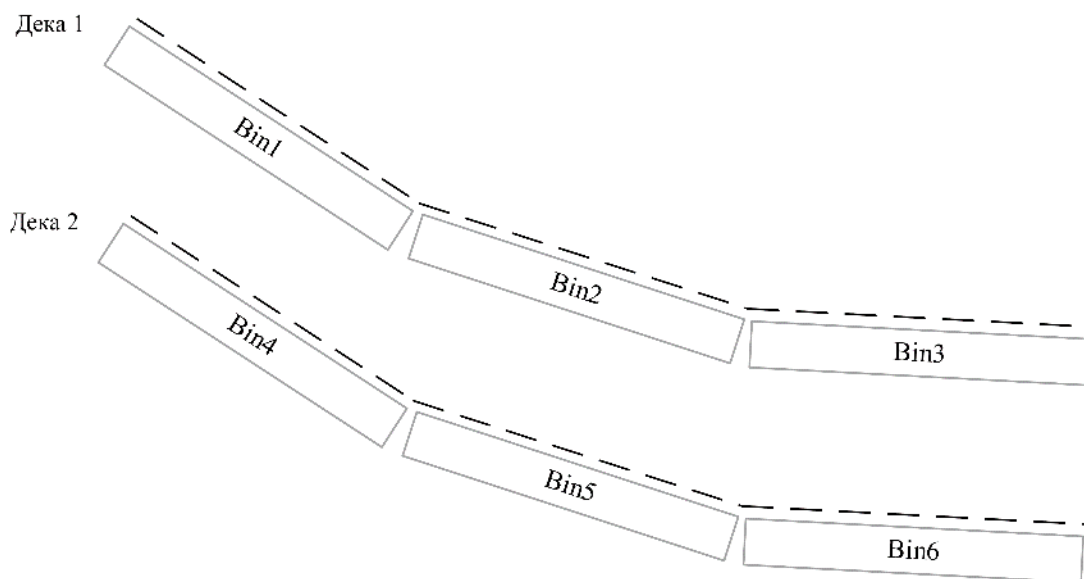


Рисунок 3.5 – Схематичне зображення геометричних бункерів

Результати з бункерів 3 і 6 показують, що еліптичний рух з амплітудою 6 мм є ефективнішим, ніж амплітуди 3 мм і 1 мм. На рисунку 3.6 показано зображення симуляції після 12 секунд, що ілюструє збільшення товщини шару матеріалу в секції 3 при зменшенні поперечної амплітуди еліптичного руху.

Загальна кількість частинок і розподіл розміру частинок у всіх трьох симуляціях були однаковими. Краща ефективність проходження була досягнута за допомогою еліптичного руху з більшою поперечною амплітудою. У цьому випадку перша симуляція мала амплітуду 6 мм, а друга і третя — 3 мм і 1 мм відповідно. На рисунку 3.7 показано відсоток частинок, які пройшли через кожен секцію відносно загальної кількості частинок.

Результати симуляцій показують, що швидкість руху в двох координатах позитивно впливає на проходження частинок, що призводить до утворення

тоншого шару матеріалу, оскільки частинки мають більше шансів контактувати з робочою поверхнею, що підвищує ефективність просіювання. Різні кути нахилу робочої поверхні також впливали на ефективність просіювача, що має форму банана.

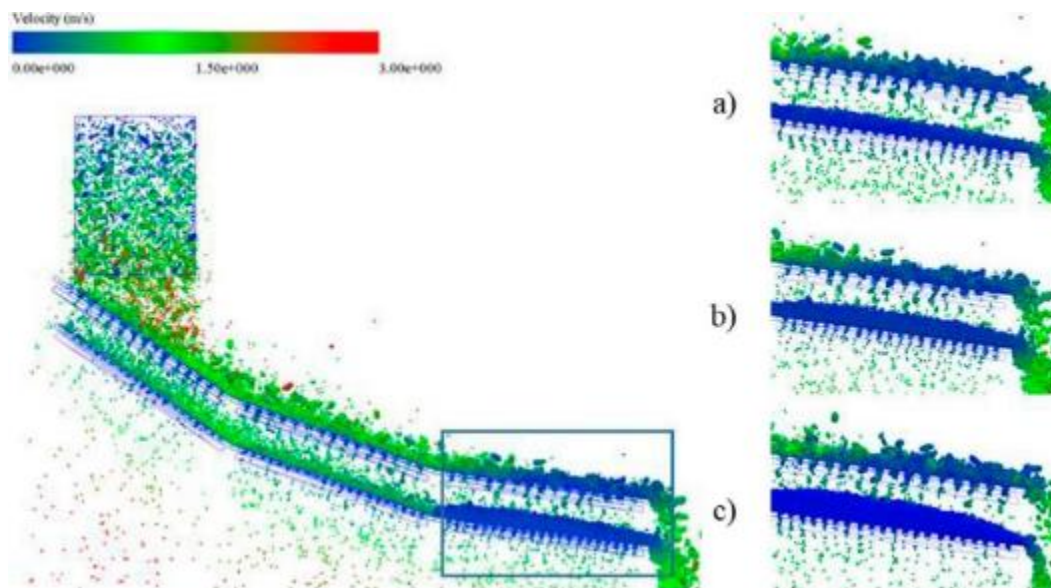


Рисунок 3.6 – Ілюстрація симуляції після 12 секунд: а) еліптичний рух з амплітудою 6 мм; б) еліптичний рух з амплітудою 3 мм; в) еліптичний рух з амплітудою 1 мм

3.3 Висновки з розділу

1. Валідація моделі підтвердила відповідність теоретичних передбачень реальним експериментальним даним, що свідчить про адекватне відображення фізичних процесів під час просіювання. Використання лабораторного вібраційного просіювача дало змогу точно контролювати ключові параметри просіювання, такі як амплітуда та форма отворів, що забезпечило ефективність проведених досліджень. Результати дозволяють застосувати отриману модель для прогнозування поведінки промислових просіювачів у виробничих умовах, мінімізуючи витрати на експерименти в реальному масштабі.

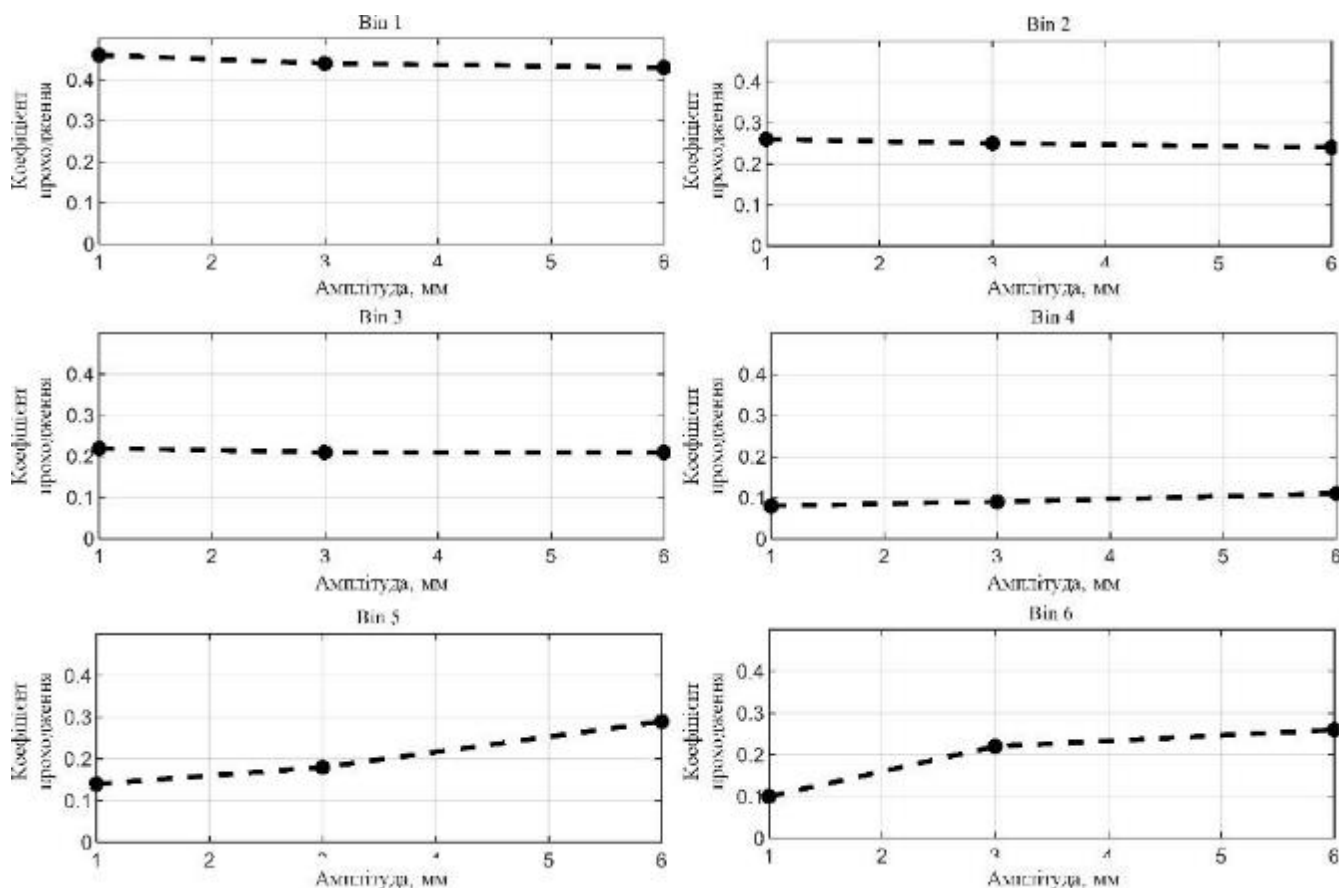


Рисунок 3.7 – Співвідношення частинок, які пройшли через кожну секцію

2. Верифікація моделі за допомогою методу дискретних елементів (DEM) дозволила детально проаналізувати поведінку частинок під час просіювання, враховуючи вплив таких параметрів, як тип руху робочої поверхні та матеріал, з якого вона виготовлена. Дослідження показали, що знос поверхні та геометрія отворів значно впливають на ефективність просіювача. Результати симуляцій підтвердили, що більша амплітуда еліптичного руху забезпечує кращу ефективність проходження частинок, тоді як зменшення амплітуди негативно впливає на результати. Отримані дані можуть бути використані для оптимізації проєктування просіювачів у промислових умовах, що дозволить зменшити витрати на обслуговування та підвищити продуктивність.

4 РЕЗУЛЬТАТ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ПРОЦЕСУ РОБОТИ ВІБРАЦІЙНОГО ПРОСІЮВАЧА ГРАНУЛЬОВАНИХ КОРМІВ

4.1 Форми та матеріали отворів сита

Результати моделювання показують, що кількість частинок, які проходять через сито, змінюється залежно від конфігурації матеріалу сита. Кількість отворів у металевому ситі більше, ніж у гумовому та поліуретановому, і тому має більший вплив, особливо в точці подачі до утворення шару матеріалу. При низькій швидкості подачі спостерігається різниця в ефективності просіювання. Зі збільшенням швидкості подачі починає утворюватися шар матеріалу, запускається процес стратифікації, що впливає на ефективність просіювання.

Кількість частинок, які відскакують від сталевого сита менша, порівняно з гумовим і поліуретановим, але ця різниця незначна та впливає лише на одношарові частинки. Моделювання показує, що форма отворів незначно впливає на ефективність просіювання, але різні ділянки сита мають різні швидкості проходження частинок залежно від форми отворів.

Було проведено додатковий аналіз кількості частинок, що проходять через сито на різних ділянках уздовж всієї довжини сита протягом певного часу. Це було зроблено за допомогою геометричних бункерів і реєстрації координат частинок у момент їх проходження через моделі. На рисунку 4.1 показано відносну кількість частинок, що проходять через різні ділянки сита на довшому інтервалі в 1500 мм протягом 15 секунд моделювання.

Кількість частинок, що проходять через бункер 1 вища, у випадку металевого сита, при швидкості подачі 20 тонн/год і 25 тонн/год. При збільшенні швидкості до 30 тонн/год кількість частинок в обох матеріалах, металевому та панельному, у бункері 1 стає майже однаковою. Однак при подачі 35 тонн/год панель ефективніша. Це пояснюється тим, що кількість отворів у металевому ситі

більша через тонший дріт, що дає більше шансів частинкам пройти через сито до утворення шару матеріалу.

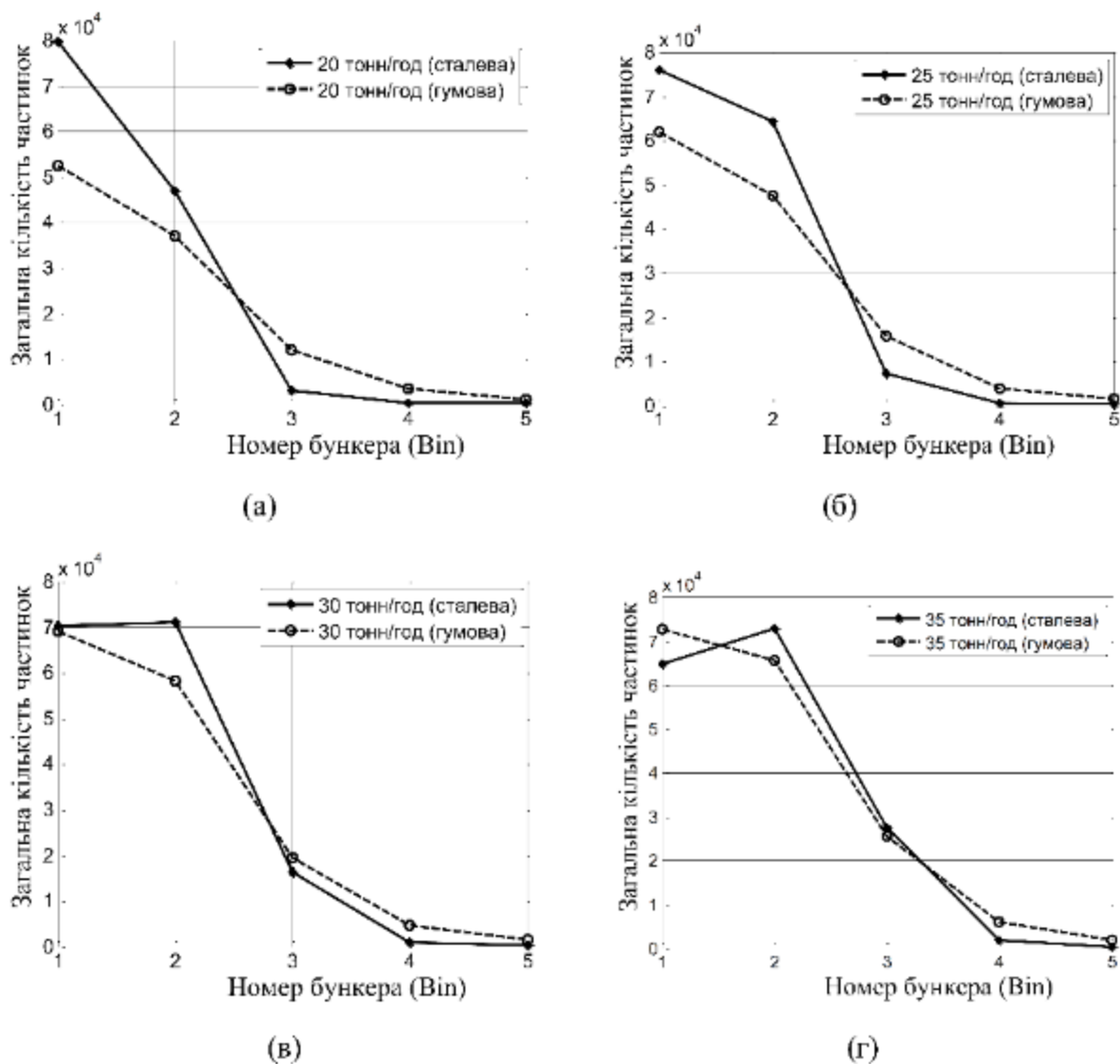
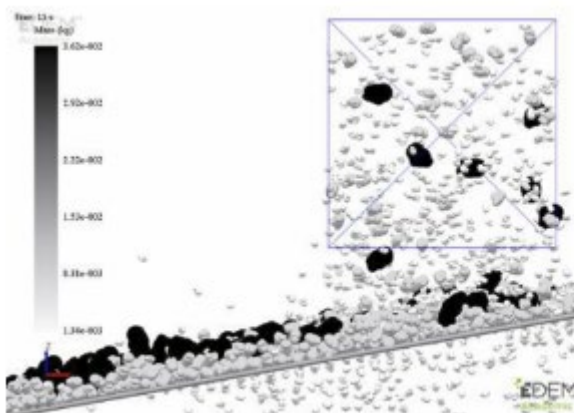
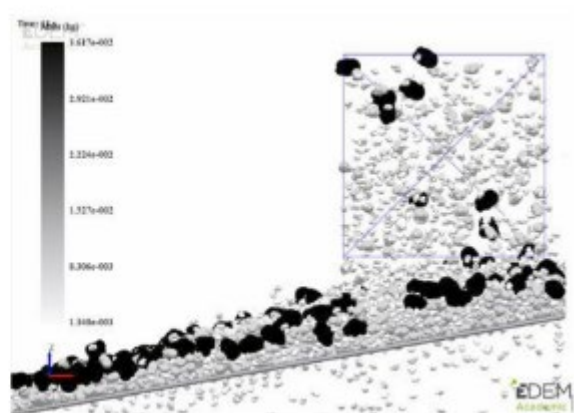


Рисунок 4.1 – Аналіз продуктивності екранування по довжині екрана

Зі збільшенням кількості матеріалу на ситі, частинки починають накопичуватися по всій зоні подачі, утворюючи купу, як показано на рисунку 4.2 для низьких і високих швидкостей подачі. Коли шар матеріалу на ситі сформований, процес стратифікації впливатиме на просіювання, даючи змогу дрібним частинкам проходити через міжчастинкові зазори.



а



б

Рисунок 4.2 – Шар частинок при подачі 20 т/год (а) і 35 т/год (б)

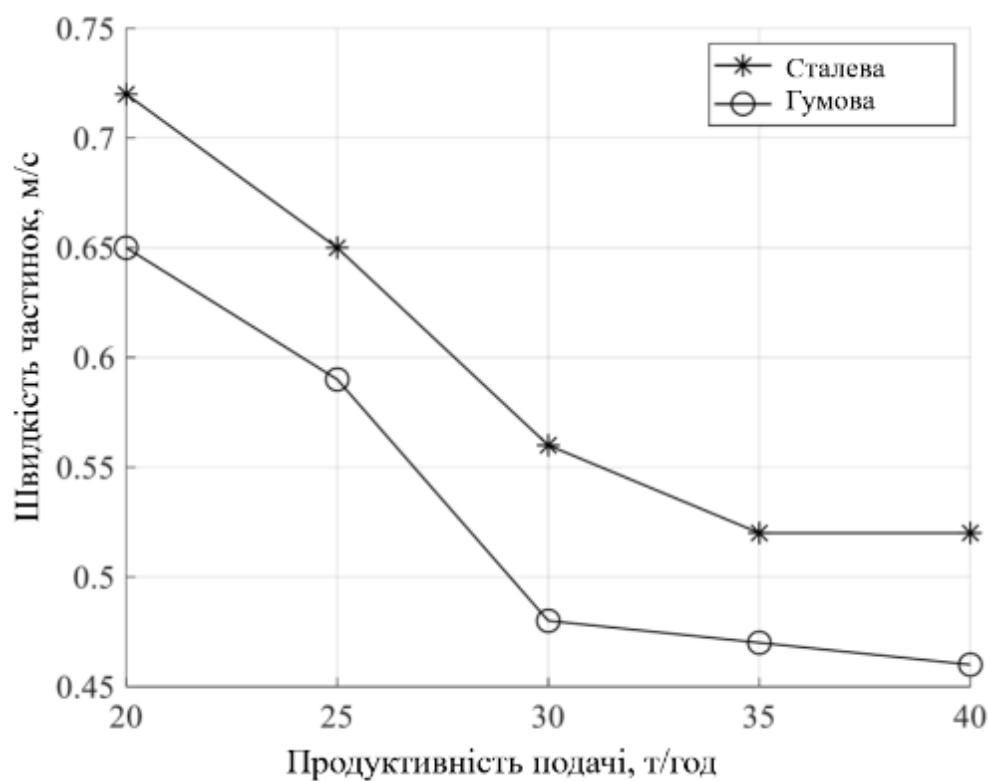


Рисунок 4.3 – Середня швидкість частинок при різних швидкостях подачі

Причина, чому більше частинок проходить через бункер 1 у панельному ситі порівняно з дротовим ситом при більшій швидкості подачі, полягає в тому, що

швидкість частинок вздовж панельного сита є меншою при використанні гумових панелей. Тому є більше часу для процесу стратифікації, і частинки мають більше шансів досягти сита. Середня швидкість частинок уздовж панелі становить 0,56 м/с, тоді як на сталевому ситі вона дорівнює 0,68 м/с за результатами моделювання. На рисунку 4.3 показано середню швидкість частинок як у панельному, так і в сталевому ситі при різних швидкостях подачі. Зі збільшенням швидкості подачі швидкість частинок зменшується через збільшення кількості зіткнень між частинками, спричинене більшою кількістю матеріалу на ситі.

Як показано на рисунку 4.1 для бункера 2, ситуація така ж, як і для бункера 1, тобто шар матеріалу все ще має такий самий вплив на процес просіювання в цій ділянці. Зі зменшенням товщини шару матеріалу частинки у шарі мають більше шансів досягти поверхні сита та пройти через нього. Під час руху частинок по поверхні сита все більше й більше дрібних частинок проходять через отвори.

Велика кількість дрібних частинок уповільнює переміщення матеріалу під час стратифікації, що можна побачити на рисунках 4.2(а) та 4.2(б). Коли частка дрібних частинок є низькою, взаємодія з іншими частинками менша, що полегшує проходження дрібних частинок через проміжки між більшими частинками. Оскільки швидкість подачі низька, дрібні частинки опиняються в нижньому шарі, який має вищу ймовірність проходження. Як показано на рисунках 4.1, зі збільшенням швидкості подачі загальна кількість частинок, що проходять через бункер 1, збільшується як у панельних, так і в дротових ситах. Це пов'язано з тим, що більше дрібного матеріалу надходить на сито. Однак це призводить до утворення товстішого шару матеріалу, що вимагає більше часу для того, щоб дрібні частинки могли стратифікуватися у проміжках між більшими частинками.

Процес проходження частинок залежить від кількості дрібних частинок, які контактують з поверхнею сита, тобто що більше частинок стикаються з поверхнею сита, то вища ймовірність їхнього проходження. Швидкість проходження зменшиться, коли найдрібніші частинки пройдуть через сито в перших двох

секціях. У моделюванні з подачею 20 та 25 тонн/год кількість частинок, що проходять через бункери 4 та 5, майже дорівнює нулю. Потім, зі збільшенням швидкості подачі, більше дрібних частинок переміщується по поверхні сита, оскільки ймовірність їхнього контакту з поверхнею сита зменшується через утворення товстішого шару матеріалу. Тому вони продовжують рухатися вздовж сита і проходять через отвори в бункерах 4 і 5, як показано на рисунках 4.1.

Щоб відстежити дрібні частинки на різних матеріалах сита, було згенеровано частинки однакового розміру та кількості. На рисунку 4.3 показано, що кількість частинок типу 2, які проходять через бункер 1 на дротовому ситі, більша, порівняно з панельним ситом, через більшу кількість отворів у дротовому ситі.

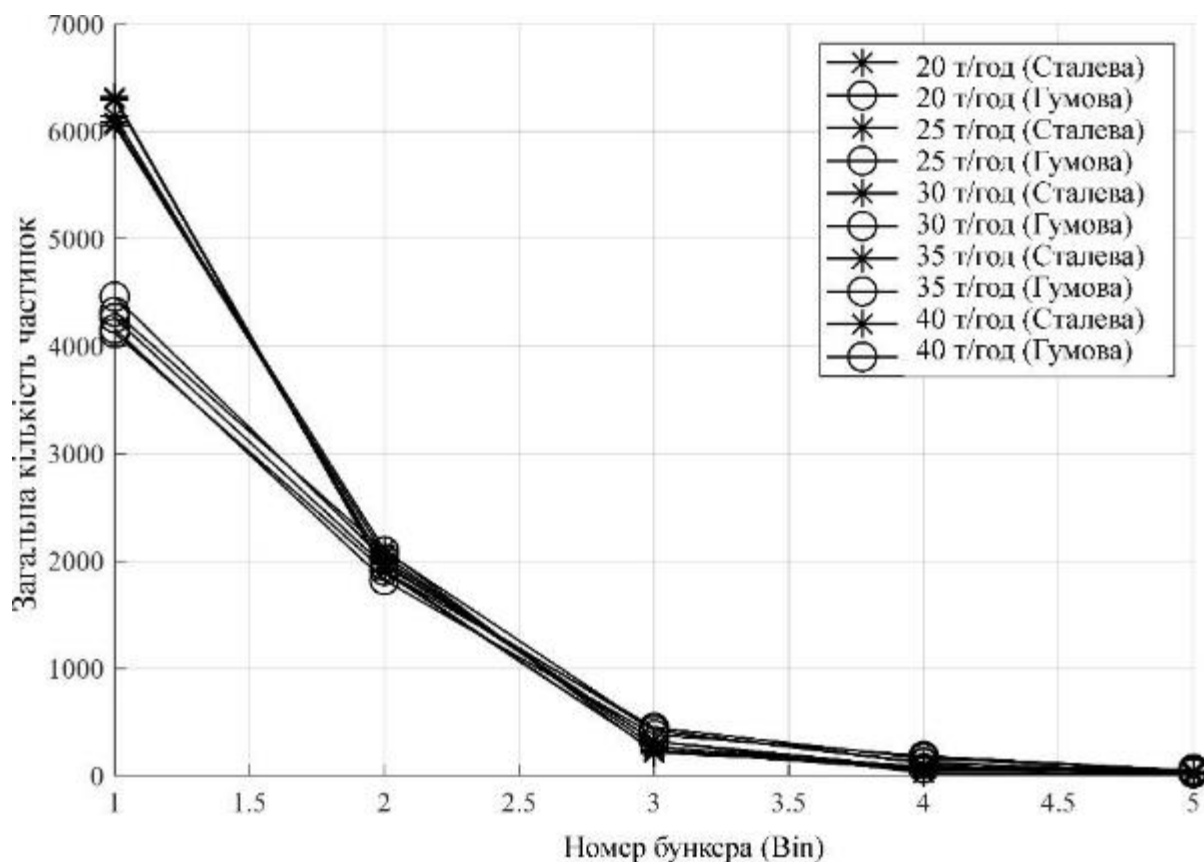


Рисунок 4.3 – Відстеження проходження частинок типу 2 уздовж екрану

Це призводить до того, що більше матеріалу проходить через сито за рахунок вільного падіння в точці подачі. На інших ділянках сита утворюється шар матеріалу, і кількість частинок типу 2, що проходять через сито, майже однакова, оскільки відбувся процес стратифікації.

Для того щоб повністю проаналізувати різні типи сит, слід також вивчити вплив матеріалу для дротових та гумових панелей. Крім форми отвору, матеріал також відрізняється: у дротовому ситі використовується сталь, а в панелях — гума або поліуретан. І сталь, і поліуретан досить жорсткі, щоб розмір отвору не змінювався під навантаженням матеріалу. З іншого боку, гума має інші еластичні властивості; при розрахунку максимального навантаження на одну з ділянок сита згідно з моделюванням було також розраховано прогин цієї ділянки, але він дуже незначний і не впливає на розмір отвору.

Рівняння для визначення швидкості частинок, наведене в рівнянні (4.1), включає кілька емпіричних параметрів, що вказує на можливість модифікації функції швидкості в майбутньому для врахування більшої кількості змінних процесу. Модель швидкості, наведена в рівнянні (4.1), є функцією амплітуди коливань R , частоти f і кута нахилу ситового настилу α . Емпірична модель не охоплює вплив розподілу розмірів частинок або різних швидкостей подачі для розрахунку швидкості проходження, але це може бути охоплено моделлю DEM.

Основна причина аналізу різних швидкостей подачі та розподілів розмірів частинок полягає в тому, що взаємодія між частинками змінюється, і це впливає на швидкість руху частинок по ситі. Нижча швидкість руху частинок під час процесу просіювання забезпечує частинкам вищу ймовірність стратифікації на ранніх етапах процесу, а отже, проходження через сито.

$$v = (0.064\alpha + 0.2)(380R - 0.18) (0.095f\alpha^{(-0.5)} + 0.018\alpha - 0.38) \quad (4.1)$$

Інший параметр, який не охоплюється емпіричною моделлю, — це тертя. Тертя між самими частинками та між частинками і ситом змінюється залежно від

різних матеріалів каменю та матеріалу ситового настилу. У випадку з моделлю DEM це охоплюється контактною моделлю Герца-Міндліна.

4.2 Щільність матеріалу подачі

У симуляціях швидкість проходження для матеріалу з низькою щільністю була нижчою, ніж для матеріалу з високою щільністю, оскільки матеріал з низькою щільністю мав нижчу швидкість стратифікації порівняно з матеріалом з високою щільністю. При стратифікації матеріалів із різною щільністю матеріалу, з високою щільністю легше переміщуватися вертикально через шар частинок. Таким чином, матеріал із високою щільністю має вищу ймовірність проходження. Збільшення відсотка проходження дрібних частинок відбулося переважно на верхньому ситі, що призвело до того, що шар частинок був товщим на нижньому ситі, а це означає, що процес стратифікації здебільшого впливає на ефективність просіювання на нижньому ситі.

Результати моделювання процесу вібраційного просіювання за допомогою DEM показані на рисунку 4.4, де швидкість подачі збільшувалася з 4 до 6 кг/с. Зі збільшенням швидкості подачі на ситі утворювався товстіший і приблизно постійної товщини шар матеріалу.

Процес стратифікації відрізняється при різній товщині шару матеріалу. Очікується, що стратифікація, яка відбувається під час просіювання, відбувається у вертикальному напрямку, тому товстіший шар матеріалу потребує більше часу для стратифікації. Один зі способів регулювання часу стратифікації – це контроль швидкості руху частинок під час просіювання шляхом регулювання нахилу та частоти вібраційного сита. Стратифікація найбільше впливає на ефективність просіювання та може бути залежною від різних факторів, таких як сегрегація матеріалу, яка, в свою чергу, залежить від фізичних характеристик частинок, таких як розмір, форма, щільність та текстура поверхні. Розмір частинок має

значний вплив на сегрегацію та стратифікацію. Дрібніші частинки можуть рухатися до сита через проміжки між великими частинками, і це є ключовим фактором ефективності просіювання.

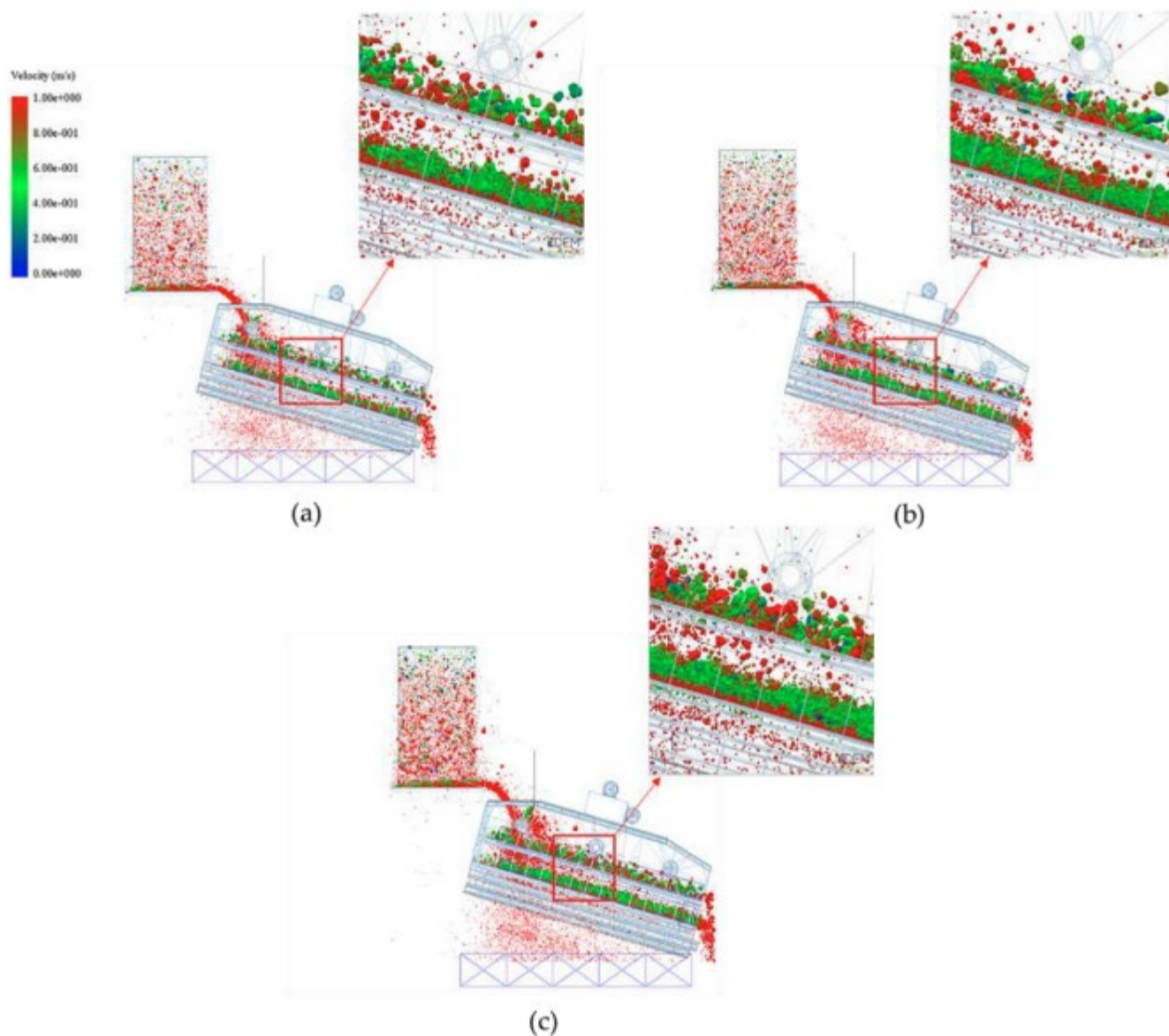


Рисунок 4.4 – Результати моделювання методом дискретних елементів (DEM) для процесу вібраційного просіювача з трьома різними швидкостями подачі: (a) 4 кг/с; (b) 5 кг/с; і (c) 6 кг/с

Різні секції вібраційного сита були проаналізовані за допомогою поділу на

секції. Насипна щільність моделювалася з використанням трьох різних швидкостей подачі. На рисунку 4.5 показано відсоток частинок (кількість, що пройшла), які пройшли через різні секції. Матеріал із низькою щільністю мав кращий прохід, ніж матеріал із високою щільністю.

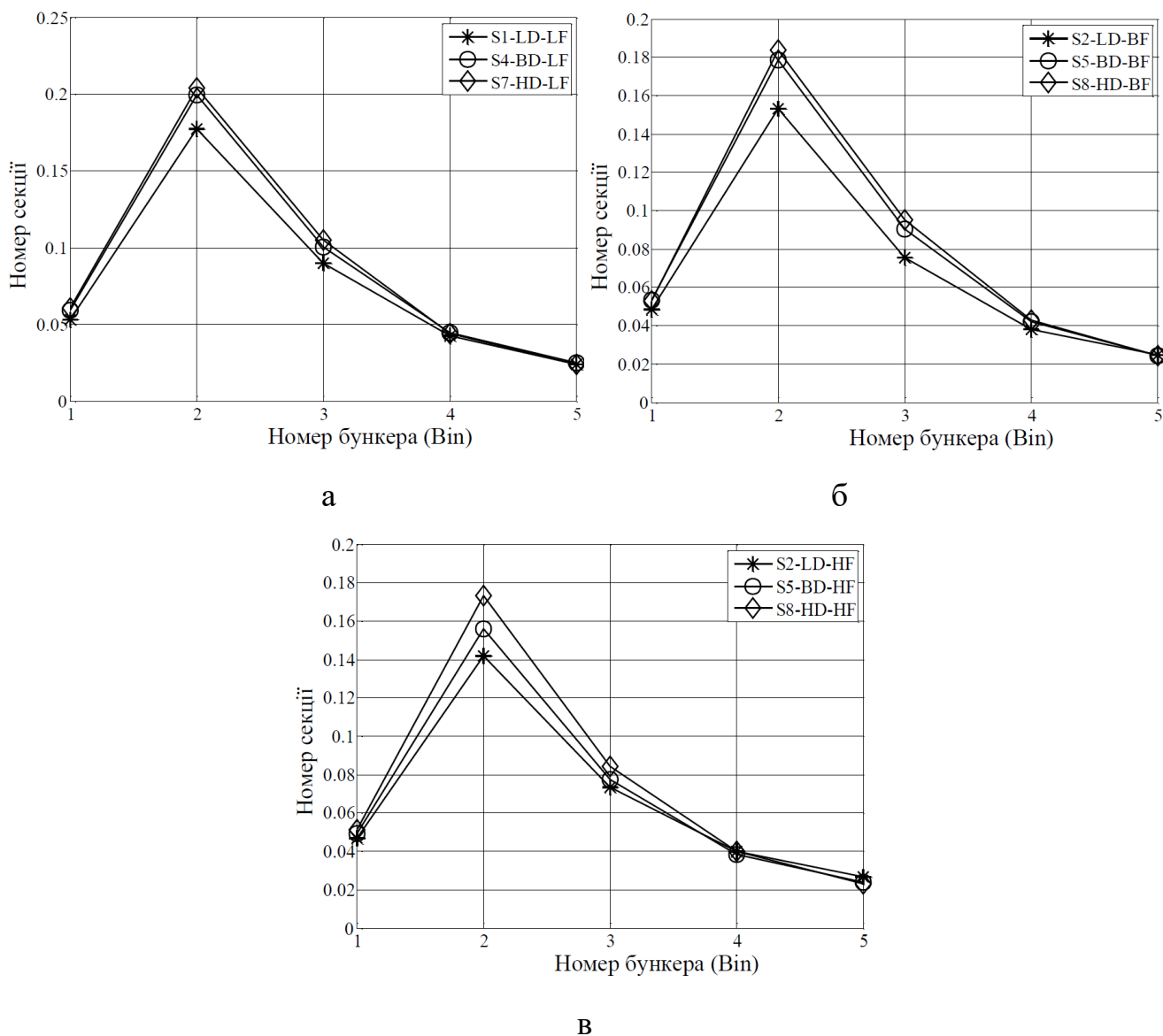


Рисунок 4.5 – Швидкість проходження в різних секціях сита для різних щільностей і швидкості подачі: (а) низька швидкість подачі, 4 кг/с, (б) середня швидкість подачі, 5 кг/с, і (в) висока швидкість подачі, 6 кг/с. (LD: матеріал низької щільності, BD: матеріал середньої щільності та HD: матеріал високої щільності)

4.3 Зношення ситового полотна

Існує кілька випробувань на знос, які здебільшого зосереджені на ударі однієї частинки; проте тест, орієнтований на одиночний удар частинки, не може безпосередньо описати постійний вплив кількох частинок на цільові ділянки.

Оскільки DEM може моделювати поведінку кількох частинок та вплив їх взаємодії, він виявився хорошою основою для вивчення впливів частинок і розвитку зношування. Після аналізу результатів моделювання видно, що ерозія та швидкість зносу від тертя були спричинені комбінованим впливом двох типів чинників: один пов'язаний з матеріалом і включає властивості, такі як твердість і зносостійкість, а інший тип чинників стосується навантаження на сито та включає час контакту, поглинену енергію та ефективну напругу.

У точці подачі швидкість частинки може бути вищою залежно від маси частинок, а також відстані від подавача до ситового полотна. Крім того, об'єм матеріалу подачі тут більший порівняно з іншими частинами ситового полотна. Враховуючи ці два аспекти, знос може бути значним. Найкращим рішенням може бути використання гуми або поліуретану в зоні подачі, щоб уникнути ерозійного зносу.

Було проведено три симуляції для аналізу зносу. У всіх було використано однаковий розподіл розмірів частинок (PSD). Швидкість подачі змінювалася для отримання різних навантажень на сито. На першому етапі знос на всьому ситовому полотні вивчався на основі загального навантаження від частинок на поверхню сита.

Три поширені матеріали, що використовуються для ситового полотна, — це сталь, поліуретан та гума, всі з яких досліджувалися в цій роботі. Об'єм матеріалу, видаленого з поверхні полотна, розраховується за допомогою моделі Арчарда, представленої в рівнянні (4.2), де Q — це об'єм матеріалу, видаленого з поверхні, H — твердість м'якшої поверхні, W — нормальне навантаження, прикладене між поверхнями, а k — коефіцієнт зносу, який дозволяє порівняти інтенсивність різних

процесів зношування:

$$Q = \frac{kW}{H} \quad (4.2)$$

Навантаження розраховується із загальної маси частинок на ситовому полотні з використанням геометричних секцій, а твердість матеріалу H варіюється залежно від матеріалу сита.

Результат, представлений на рисунку 4.6, показує, що маса матеріалу на ситі має лінійний зв'язок зі зносом від тертя. Сталь і поліуретан більш чутливі до зносу порівняно з гумою.

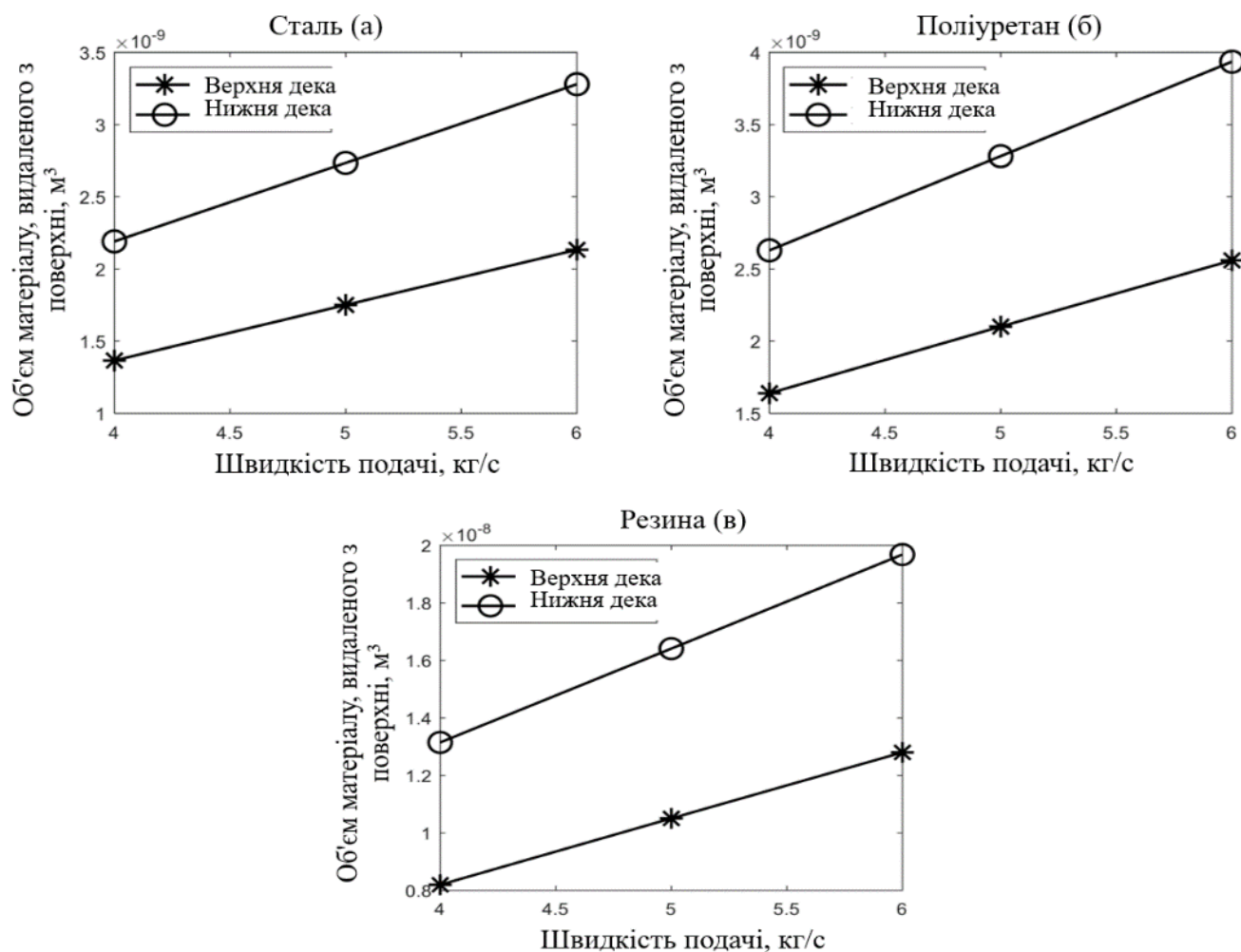


Рисунок 4.6 – Об'єм матеріалу, видаленого з поверхні різними швидкостями подачі

Маса частинок вздовж ситового полотна змінюється через проходження матеріалів через сито, що робить знос нерівномірним по довжині ситового полотна. З цієї причини знос сита вивчається у чотирьох різних секціях на кожному ситі, як показано на рисунку 4.7. Кожна секція представлена однією геометричною коміркою, що використовується для експорту даних у цій області.

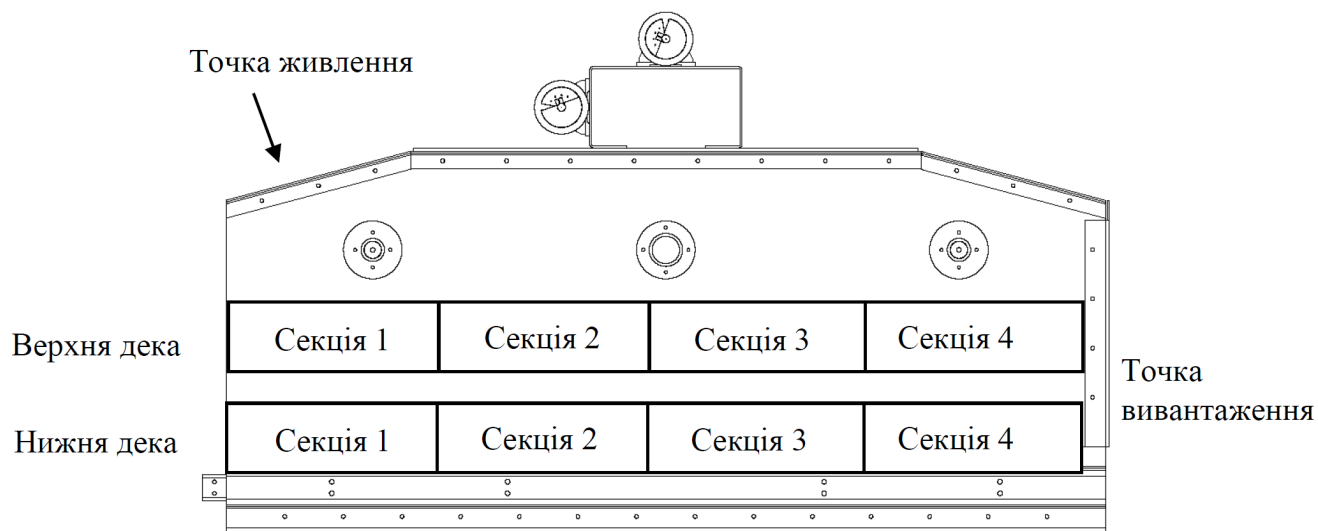


Рисунок 4.7 – Схематичне зображення моделі CAD з різними розділами

Кількість матеріалу більша в секціях 1 і 2 на обох ситах; внаслідок цього навантаження на ситове полотно вище в цих двох секціях. На рисунку 4.6 показано, як розподіл маси матеріалу впливає на знос ситового полотна в різних секціях сита.

Вплив частинок, що вдаряються об поверхню ситового полотна, є досить високим у точці подачі через їх високу швидкість, яка виникає в результаті вільного падіння. Такий вид зносу є дуже шкідливим, і процес зношування відбувається досить швидко. Швидкість частинок у точці подачі змінюється залежно від маси частинок і відстані від живильника до поверхні ситового полотна. Більша маса частинок і довша відстань дають вищу швидкість частинок.

Іншими основними факторами, які сильно впливають на ерозійний знос, є

форма частинок і кут удару, який є функцією швидкості частинок і руху ситового полотна. Кут удару можна враховувати, коли одна частинка вдаряється об поверхню, але оскільки є взаємодія між частинками, обчислення кута удару стає складнішим. Інша відмінність полягає у варіації твердості та часу контакту, які змінюються під час взаємодії частинок, а також у варіації властивостей частинок.

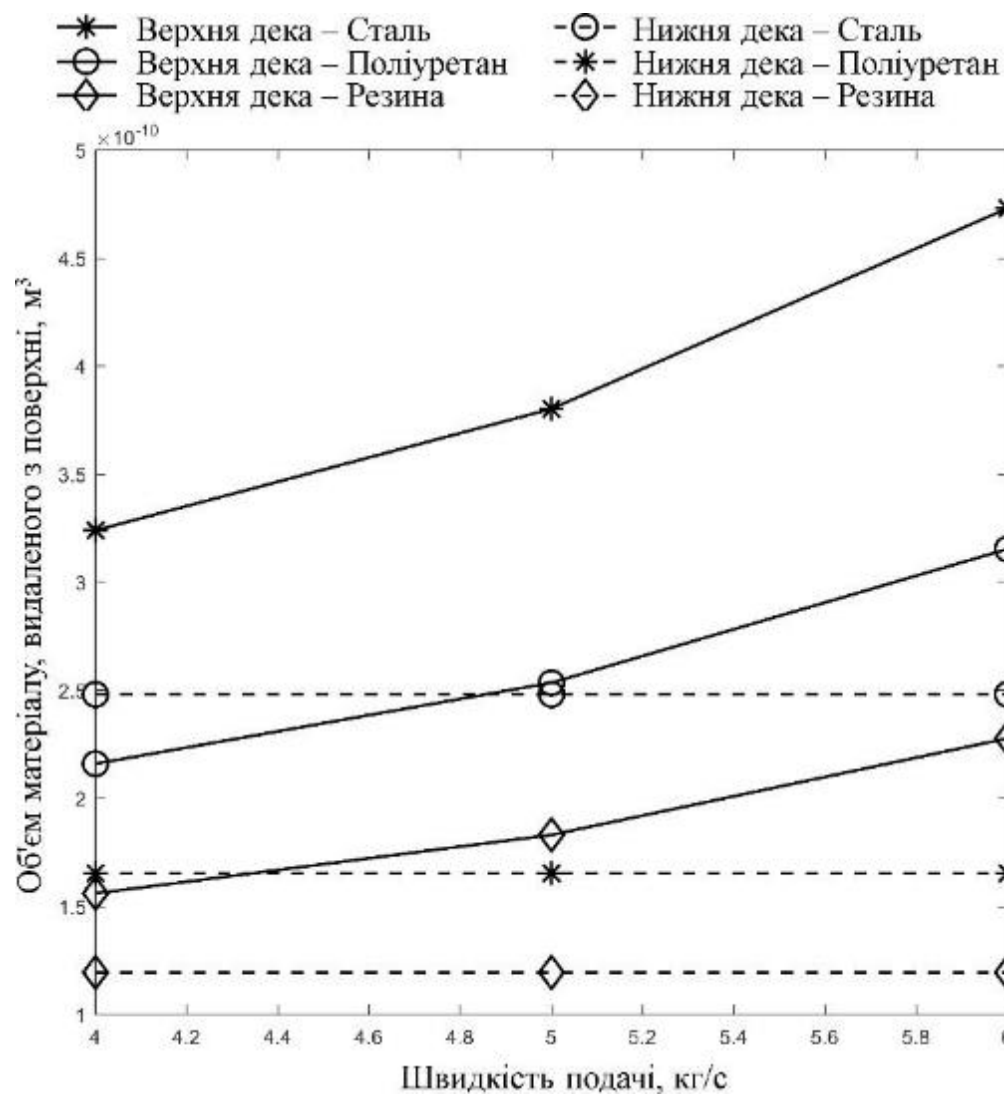


Рисунок 4.8 – Об'єм матеріалу, видаленого ерозійним зносом у точці подачі при різних швидкостях подачі

Середня швидкість частинок, що вдаряються об ситове полотно, була розрахована за допомогою DEM і виявилася близько 1,3 м/с. Було досліджено

механізм кореляції властивостей ерозійного зношення різних матеріальних поверхонь. На рисунку 4.8 показано результати для матеріалу, видаленого ерозійним зносом у зоні подачі для трьох різних матеріалів за допомогою рівняння (4.3):

$$E = \frac{k\rho U^2}{2H} \quad (4.3)$$

де k — це коефіцієнт зносу, ρ — густина матеріалу, що піддається ерозії, U — швидкість, а H — твердість. Як видно, сталь є більш чутливою до ерозійного зносу, а поліуретан і гума мають нижчу швидкість зносу.

4.4 Ефективність просіювання

На рисунку 4.9 показано модель сита, використану в чисельному експерименті.

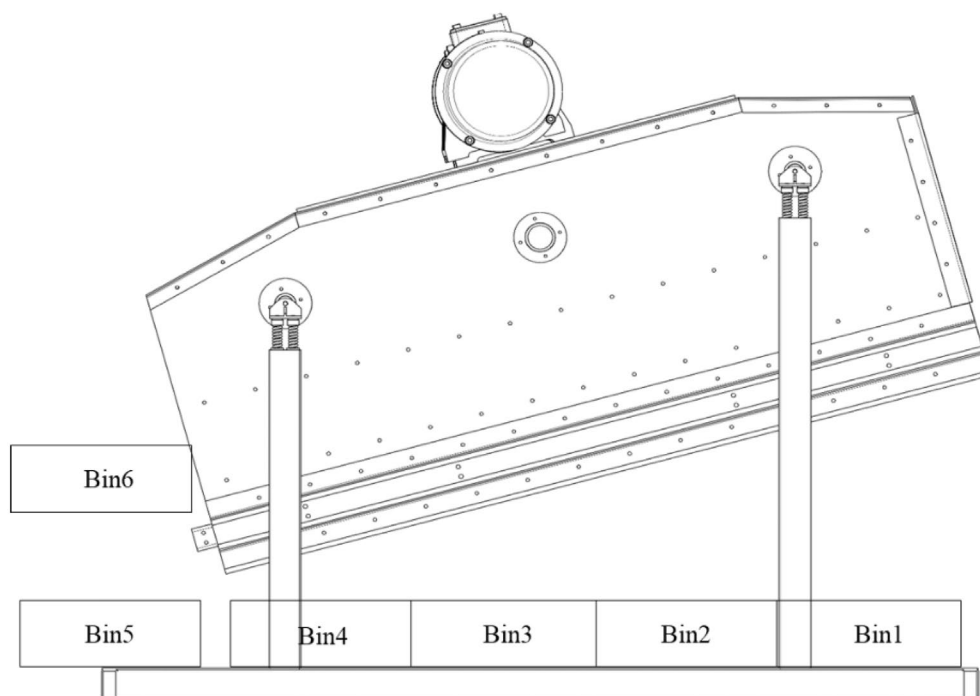


Рисунок 4.9 – Розміщення геометричних бункерів у симуляції

У симуляціях для дослідження поведінки частинок та порівняння результатів симуляції з експериментальними даними було використано метод «один фактор за раз». Кожен експеримент було проведено двічі. У симуляціях було використано той самий метод із геометричними бункерами для експорту даних.

Для вивчення поведінки частинок як у симуляціях було проаналізовано вплив різних параметрів, зокрема швидкість частинок уздовж сита. У симуляціях швидкість частинок зростала від 0,16 до 0,8 м/с. Найменша швидкість спостерігалася біля точки подачі, а найбільша — біля вихідного кінця. Причина цього явища полягає в тому, що частинки інтенсивніше взаємодіють між собою в точці подачі через товстіший шар частинок. Як тільки дрібні частинки проходять через сито в секціях 1 і 2, товщина шару частинок на верхньому ситі зменшується. Товщину шару частинок у різних секціях можна побачити на рисунку 4.10.

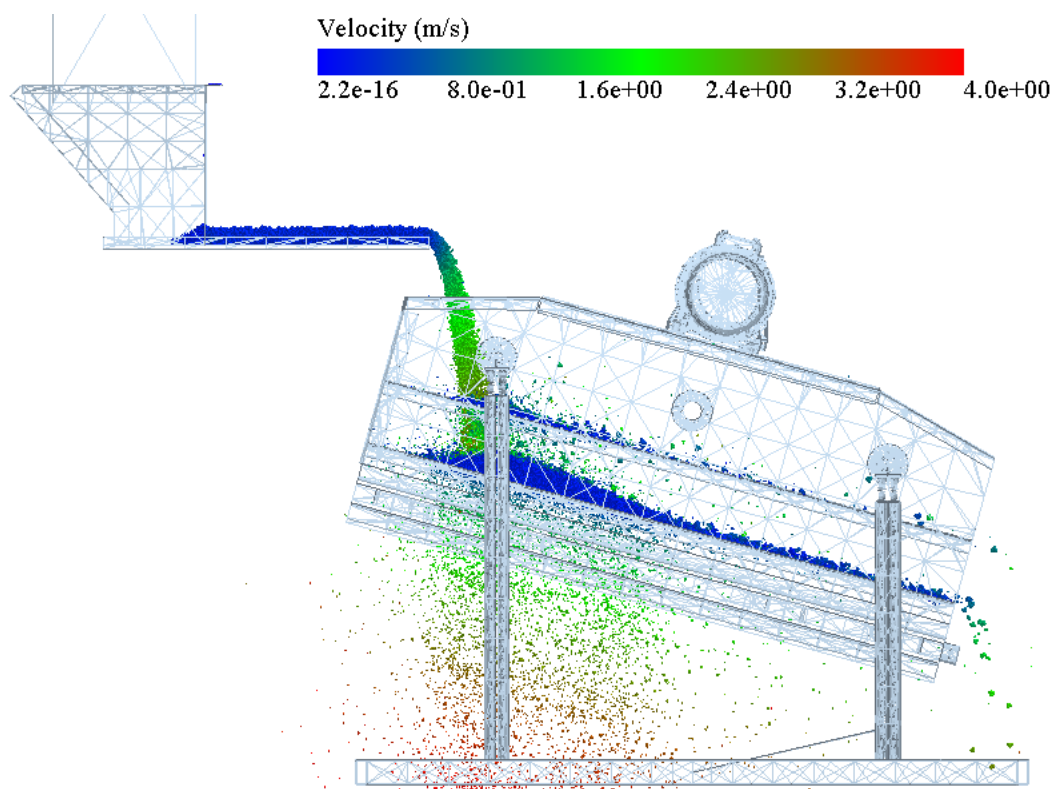


Рисунок 4.10 – Результат моделювання через 8 с

Ще одним результатом симуляції, що був вивчений, був розподіл часток за розмірами (PSD) кінцевого продукту. На рисунку 4.11 показано результати просіювання з різних бункерів у всіх чисельних експериментах. Вплив зміни швидкості подачі та амплітуди не є значним для поведінки частинок. Відхилення маси різних PSD є мінімальним, і причина невеликої варіації полягає у сегрегації матеріалу в бункері.

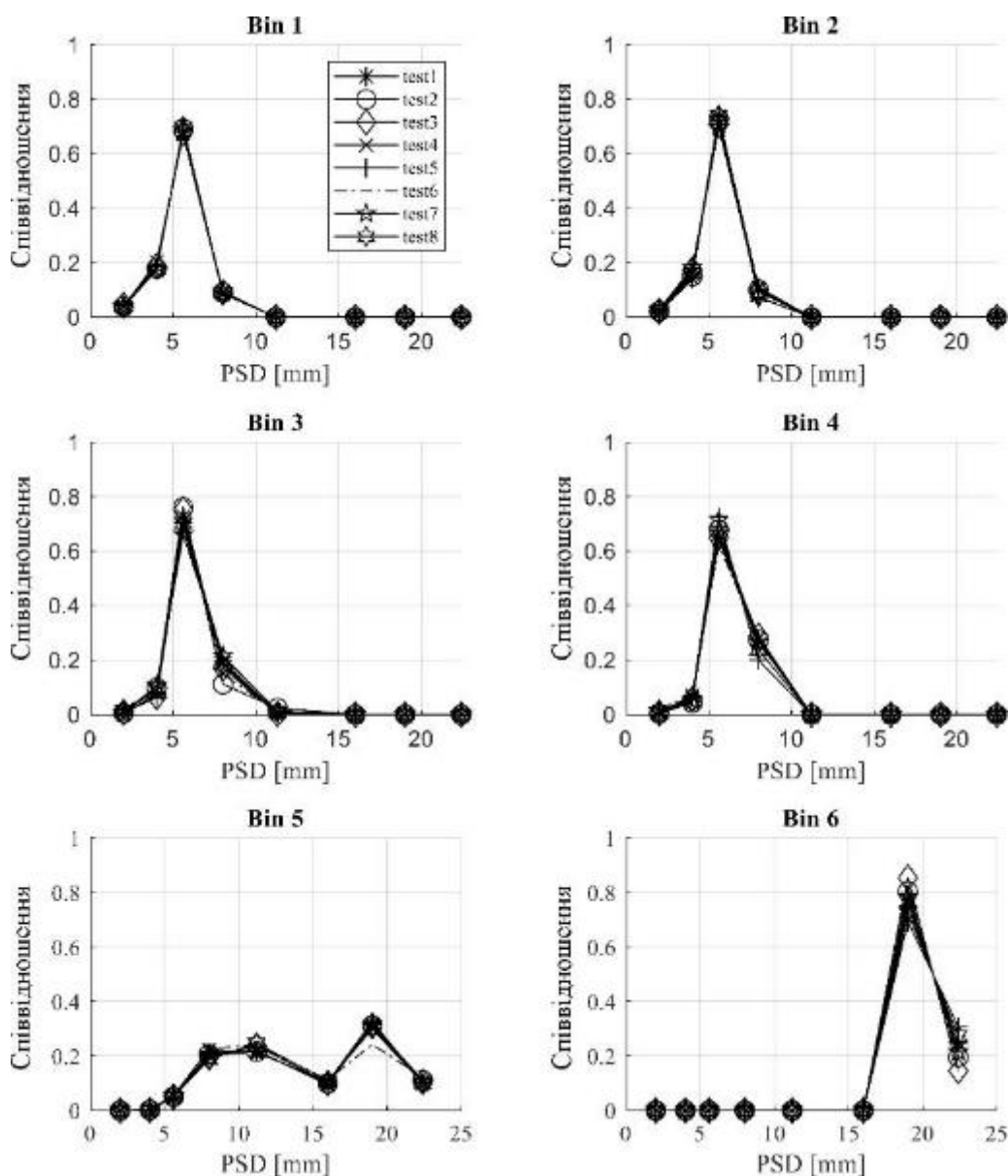


Рисунок 4.11 – Розподіл частинок за розмірами (PSD) з кожного бункера

Найбільш поширене визначення ефективності сита полягає в тому, як стабільний процес просіювання спричиняє варіації маси частинок, що проходять через сито вздовж його довжини. Це означає, що ефективність — це відношення недосіяного матеріалу в подачі, який проходить через сито, до недосіяного матеріалу, який повинен пройти через сито. Цю ефективність можна визначити за формулою:

$$E(\%) = \frac{100(e - v)}{e(100 - v)} \times 100 \quad (4.4)$$

де e — відсоток недосіяного матеріалу в подачі, а v — відсоток недосіяного матеріалу у відсіві.

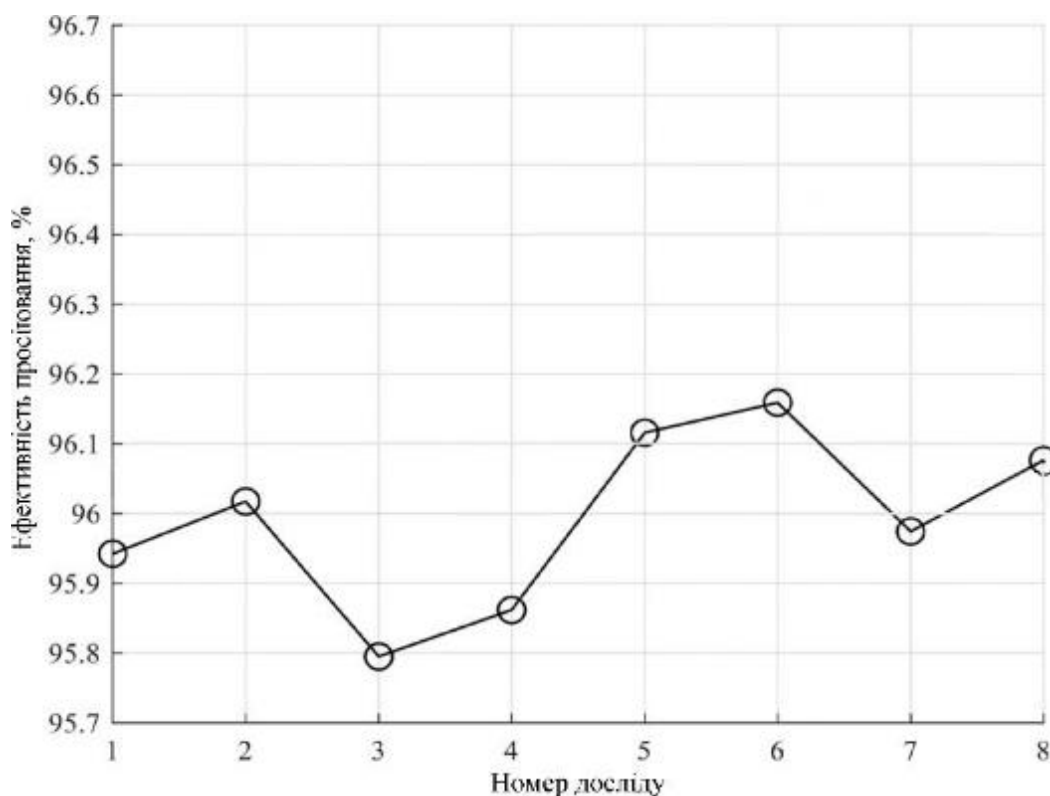


Рисунок 4.12 – Крива ефективності просіювання

На рисунку 4.12 показано криві ефективності як для симуляцій, так і для експериментів. Результати показують, що для обох випадків тест 5 і тест 6 є найбільш ефективними. Причиною цього є те, що більша частина площі сита

використовується через меншу швидкість подачі, що означає, що матеріал падає ближче до подавача. Іншою причиною є більша амплітуда, яка позитивно впливає на процес стратифікації.

4.5 Висновки з розділу

1. Результати моделювання показують, що на ефективність просіювання впливають матеріали сита, кількість отворів і швидкість подачі матеріалу. Металеве сито, завдяки більшій кількості отворів, демонструє кращі результати на початку процесу просіювання, але зі збільшенням швидкості подачі гумові та поліуретанові панелі стають ефективнішими через нижчу швидкість руху частинок, що сприяє стратифікації та проходженню дрібних частинок.

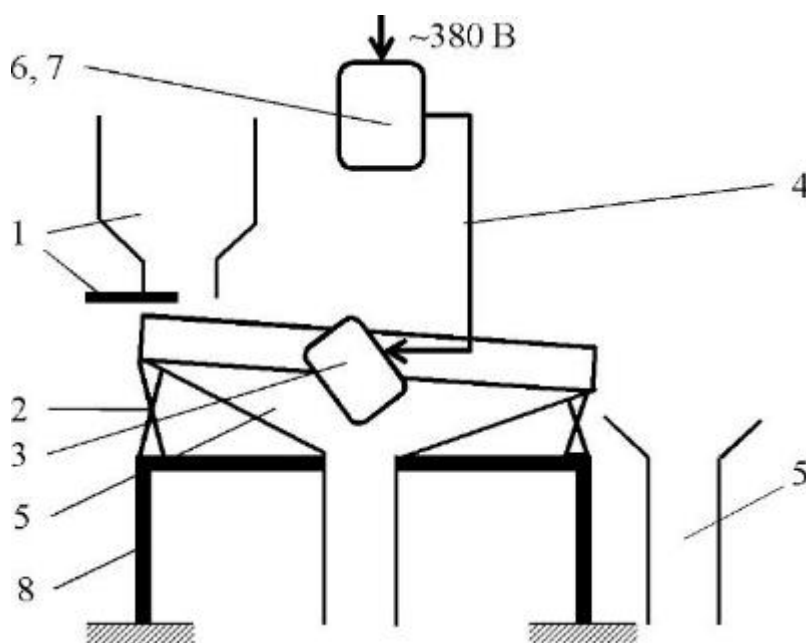
2. Матеріал з високою щільністю має більшу ймовірність проходження через сито завдяки швидшій стратифікації, порівняно з матеріалом низької щільності. При збільшенні швидкості подачі товщина шару матеріалу зростає, що уповільнює процес стратифікації та впливає на ефективність просіювання, особливо на нижньому ситі.

3. Зношення ситового полотна залежить від властивостей матеріалу сита (твердість, зносостійкість) і навантаження (швидкість частинок, маса матеріалу). Сталь піддається більшому зносу порівняно з поліуретаном і гумою, особливо в зоні подачі, де швидкість частинок найвища. Для зменшення ерозійного зносу рекомендується використовувати поліуретан або гуму в критичних зонах сита.

4. Ефективність просіювання залежить від розподілу частинок і параметрів, таких як швидкість подачі та амплітуда вібрацій. Найкращі результати досягаються при меншій швидкості подачі та більшій амплітуді, оскільки це забезпечує кращу стратифікацію матеріалу та використання більшої площі сита. Різниця в поведінці частинок уздовж сита впливає на ефективність просіювання, причому найбільша швидкість частинок спостерігається біля вихідного кінця.

5 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

Аналіз технічного та організаційного рівня робочого місця здійснюється шляхом оцінки таких аспектів: оснащеність робочого місця необхідними інструментами, вимірювальними приладами та їх технічний стан; відповідність технологічного процесу проєктній документації, обладнанню та нормативно-технічним вимогам, а також відповідність характеру і обсягу виконуваних робіт, оптимальність режимів роботи; вплив технологічних процесів, що здійснюються на інших робочих місцях; відповідність процесів, обладнання, інструментів і контрольних засобів вимогам стандартів безпеки та нормам охорони праці.



1 – бункер і регульована заслінка; 2 – пружини; 3 – вібродвигун; 4 – електропроводка;
5 – забірники для проходу і виходу; 6 – частотний перетворювач, кнопки «Пуск» та
«Стоп»; 7 – звукова і світлова сигналізація; 8 – рама

Рисунок 5.1 – Вузли розробленого вібропросіювача комбікормів

У ході обстеження експериментального зразка вібропросіювача комбікормів було виявлено елементи, що потребують уваги з точки зору безпеки для оператора

(рисунок 5.1): бункер і регульована заслінка; пружини; вібродвигун; електропроводка; забірники для проходу і виходу матеріалу; частотний перетворювач, кнопки «Пуск» та «Стоп»; звукова і світлова сигналізація; рама.

Також факторами, що впливають на порушення безпеки праці оператора, є рівень шуму, освітлення та рівень пилу.

Небезпечний виробничий фактор – це виробничий фактор, що за певних умов може спричинити травмування людини, втрату працездатності або навіть призвести до летального випадку. До небезпечних факторів, що можуть виникнути під час експлуатації вібропросіювача, належать: коливання напруги та частоти струму в електромережі; можливість падіння деталей та предметів з висоти; запиленість повітря; вплив шуму та вібрації.

1. Допустимі відхилення напруги живильної мережі під час тривалої роботи з номінальним навантаженням складають від +10 до -5 %. Якщо напруга знижується більше ніж на 5 %, втрати у мідних обмотках статора не компенсуються, збільшується струм та втрати у роторі, що може призвести до перевищення допустимої температури обмотки статора, спричиняючи ризик займання електродвигуна та пожежі, яка може викликати опіки різного ступеня у людини.

2. Під час роботи з вібропросіювачем можуть виникати такі небезпечні та шкідливі фактори: рухомі частини механізмів, зокрема ротор та ексцентрик вібродвигуна; конструкційні елементи, які можуть руйнуватися, такі як пружини, встановлені на рамі; відкриті або незакріплені захисні кожухи, що створюють ризик відльоту уламків та пилу; гострі краї інструментів та обладнання.

3. При високих навантаженнях під час роботи вібропросіювача можливе значне запилення повітря, що при вдиханні може спричинити тяжкі захворювання, такі як пневмоконіози (силікоз, силікатоз), пиловий бронхіт, бронхіальна астма, пневмонія та інші. Пил може викликати запалення слизових оболонок очей та носа, а також захворювання шкіри, такі як фурункульоз або екзема.

4. Робота вібропросіювача супроводжується шумом від рухомих механізмів, що може мати негативний вплив на організм. Вплив шуму доведено як фактор, що може викликати нервові, серцево-судинні захворювання, виразкову хворобу, порушення обміну речовин та слухові розлади.

5. Блок керування електродвигуном має кнопки, що при недотриманні правил безпеки можуть спричинити ураження електричним струмом. Струм, що проходить через тіло людини, може викликати термічні, електролітичні та біологічні ефекти, які залежать від сили струму, опору тіла та тривалості дії. Це може призвести до серйозних ушкоджень тканин, порушень біохімічних процесів та функцій органів.

Небезпечні та шкідливі виробничі фактори можуть спричинити травми або захворювання при недотриманні правил безпеки та експлуатації обладнання. Під час обстеження вібропросіювача інших небезпечних факторів не виявлено. У порівнянні з аналогічними пристроями, вібропросіювач при дотриманні норм безпеки не створює додаткових загроз. Далі наведено карту безпеки праці для вібропросіювача (таблиця 5.1).

Таблиця 5.1 – Карта безпеки праці для вібропросіювача

№	Найменування вузла	Технічні вимоги безпеки	Методи і засоби контролю	Періодичність
1	Бункер і регульована заслінка	Захист завантажувального вікна кожухом під час роботи	Зовнішній огляд	Щозмінний
2	Пружини	Контроль ступеня зношення	Зовнішній огляд, випробування	Щомісячний
3	Вібродвигун	Чистота, надійність кріплень, справність заземлення, контроль температури	Зовнішній огляд, випробування	Сезонний

№	Найменування вузла	Технічні вимоги безпеки	Методи і засоби контролю	Періодичність
4	Електропровід	Захист від механічних пошкоджень, опір ізоляції не менше 0,5 МОм	Зовнішній огляд	Щозмінний
5	Забірники пилу	Справність аспіраторів	Зовнішній огляд	Щомісячний
6	Частотний перетворювач	Кнопки «Пуск» (зелена) і «Стоп» (червона) мають виступати над панеллю	Зовнішній огляд	Щомісячний
7	Сигналізація	Справність звукової та світлової сигналізації	Випробування	Щомісячний
8	Рама	Надійність зварних швів	Випробування	Сезонний
—	—	Рівень шуму під час роботи не більше 80 дБА	Перевірка шумоміром	Щозмінний
—	—	Освітлення не менше 60 лк у зоні роботи	Перевірка люксометром	Щомісячний

Працівники кормоцеху повинні добре знати і неухильно виконувати інструкції щодо дій у випадку загрози або виникнення надзвичайних ситуацій.

Аналіз організації робочого місця вібропресіювача комбікормів виявив, що основними аспектами, які потребують уваги з точки зору безпеки, є стан технічного обладнання, запиленість повітря, рівень шуму та дотримання електробезпеки. Недотримання вимог може призвести до травм, професійних захворювань та інших негативних наслідків для здоров'я працівників.

6 ЕКОНОМІЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ ВІБРАЦІЙНОГО ПРОСІЮВАЧА ГРАНУЛЬОВАНИХ КОРМІВ

Аналіз економічної доцільності використання запропонованого вібропросіювача для гранульованих кормів, порівняно з просіювачем ЩМА, був проведений з використанням загальноприйнятих методик. Оцінка виконувалась шляхом порівняння абсолютних показників двох варіантів обладнання, згідно з рекомендаціями. Критерієм для оцінки ефективності слугували приведені витрати на одиницю виконаних робіт, до яких віднесено прямі експлуатаційні витрати, економічний ефект на річному рівні, витрати праці та енергоресурсів. Розрахунки проводились для птахоферми з кормоцехом, який обробляє 10000 тонн гранул щорічно.

Оскільки єдина різниця між базовою та проєктованою лініями виробництва комбікормів полягає у конструкції просіювача, порівняння було виконано за показниками питомих експлуатаційних витрат і додаткових капітальних вкладень.

Для розрахунку питомих експлуатаційних витрат використовувалась наступна формула:

$$\Pi = \Pi_3 + \Pi_E + \Pi_A + \Pi_T$$

де: Π_3 – витрати на оплату праці персоналу; Π_E – витрати на електроенергію; Π_A – амортизаційні витрати; Π_T – витрати на ремонт та технічне обслуговування.

Для визначення витрат на заробітну плату, використовувалась формула:

$$\Pi_3 = n f k t / Q$$

де: n – кількість працівників (1 для обох варіантів); f – погодинна тарифна ставка (80 грн./год.); k – коефіцієнт нарахувань на заробітну плату (1,372); t – річна кількість робочих годин; Q – продуктивність обладнання.

Річна кількість робочих годин для базового варіанту (ЩМА) складала 10000 годин (при продуктивності 1000 кг/год), а для вібропросіювача – 8333 годин (при продуктивності 1200 кг/год).

Питомі витрати на заробітну плату склали:

- Для базового варіанту: 109,76 грн./т
- Для проєктованого: 91,46 грн./т.

Далі розраховувались витрати на електроенергію за формулою:

$$ПЕ = ЦЕ WE t / Q$$

де: ЦЕ – вартість 1 кВт·год (5,81 грн.); WE – споживана потужність (2,8 кВт для базового варіанту і 3,2 кВт для проєктованого).

Отже, питомі витрати на електроенергію склали:

- Для базового варіанту: 16,26 грн./т
- Для проєктованого: 15,49 грн./т.

Амортизаційні витрати визначались за формулою:

$$ПА = Сб / (100 Q)$$

де: Сб – балансова вартість обладнання (200000 грн. для базового і 250000 грн. для проєктованого варіанту); Q – норма амортизації (15%).

Питомі амортизаційні витрати для базового варіанту склали 3 грн./т, а для проєктованого – 3,75 грн./т.

Витрати на технічне обслуговування і ремонт визначались за аналогічною формулою, з нормою витрат 15%. Витрати склали:

- Для базового варіанту: 3 грн./т
- Для проєктованого: 3,75 грн./т.

Загальні питомі експлуатаційні витрати:

- Базовий варіант: 132,62 грн./т
- Проєктний варіант: 113,4 грн./т.

Прямі річні витрати за формулами:

$$З = Q t П$$

склали: для базового варіанту: 1326200 грн.; для проєктованого: 1134000 грн.

Економічний ефект від впровадження нової машини складав 192200 грн. на рік, а термін окупності додаткових вкладень – 0,26 року.

ВИСНОВКИ

1. Оптимізація процесу виробництва комбікормів і підвищення продуктивності тваринництва досягається через вдосконалення технологій гранулювання та використання сучасних вібраційних просіювачів. Це дозволяє знизити енерговитрати, покращити якість комбікормів та зменшити їх втрати, що, у свою чергу, підвищує продуктивність тварин і знижує загальну собівартість продукції, забезпечуючи економічну ефективність виробництва.

2. Оптимізація процесу просіювання потребує всебічного аналізу впливу різних параметрів, що забезпечує високу якість кінцевого продукту та ефективність роботи обладнання. Застосування DEM-симуляцій та лабораторних випробувань дозволяє точно моделювати поведінку частинок і налаштовувати ключові параметри для максимізації продуктивності просіювання. Фізико-математичні моделі, такі як модель Карри та метод дискретних елементів (DEM), є важливими інструментами для точного прогнозування та оптимізації процесу.

3. Валідація та верифікація моделі просіювання підтвердили її здатність точно відображати фізичні процеси, що відбуваються під час роботи обладнання, дозволяючи використовувати результати для промислових застосувань. Використання DEM-симуляцій та лабораторних експериментів допомогло детально проаналізувати вплив параметрів, таких як амплітуда руху та знос поверхні, на ефективність просіювача. Отримані результати сприяють оптимізації конструкції просіювальних систем, підвищенню їх продуктивності та зниженню витрат на обслуговування.

4. Ефективність процесу просіювання значною мірою залежить від матеріалу сита, кількості отворів та швидкості подачі матеріалу. Металеві сита показують високі результати на початкових етапах, однак при збільшенні швидкості подачі гумові та поліуретанові панелі стають ефективнішими завдяки сприянню стратифікації частинок. Крім того, матеріали з високою щільністю

проходять крізь сито швидше, але при підвищеній швидкості подачі процес стратифікації сповільнюється через збільшення товщини шару. Зношування сит також залежить від матеріалу сита і навантаження, причому сталь швидше піддається зносу в зонах із високою швидкістю частинок. Поліуретанові та гумові панелі рекомендуються для зменшення зносу. Оптимізація процесу досягається шляхом регулювання швидкості подачі та амплітуди вібрацій для покращення стратифікації і використання площі сита, що дозволяє підвищити ефективність просіювання.

5. Аналіз організації робочого місця вібропросіювача комбікормів виявив, що основними аспектами, які потребують уваги з точки зору безпеки, є стан технічного обладнання, запиленість повітря, рівень шуму та дотримання електробезпеки. Недотримання вимог може призвести до травм, професійних захворювань та інших негативних наслідків для здоров'я працівників.

6. Результати аналізу економічної ефективності показують, що впровадження вібропросіювача для гранульованих кормів дозволяє знизити питомі річні експлуатаційні витрати і отримати річний економічний ефект у 192200 грн. Окупність нової машини становить 0,26 року, що свідчить про доцільність її використання.

Бібліографія

1. Алієв Е. Б. (2023). Чисельне моделювання процесів агропромислового виробництва: підручник. Київ: Аграрна наука, 340 с. ISBN 978-966-540-584-9. DOI: 10.31073/978-966-540-584-9
2. 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: ЛПА. 192 с. ISBN 978-966-981-687-0.
3. Aliiev E., Maliehin R., Ivliev V., Aliieva O. Simulation of the process of cavitation treatment of liquid feed [Техніко-технологічне забезпечення комплексної безвідходної переробки рослинної сировини олійних культур у корми для органічного тваринництва]. Scientific Horizons, 24(2), 2021. P. 16-26. DOI: 10.48077/scihor.24(2).2021.16-26.
4. Шевченко І.А. Моделювання процесу потокового змішування кормосумішей з використанням методу дискретних елементів / І.А. Шевченко, Е.Б. Алієв, С.О. Доруда // Механізація та електрифікація сільського господарства – Глеваха, 2013. – Вип. 97. Том 1. – С. 536-544.
5. Шевченко І.А. Результати моделювання процесу потокового змішування кормосумішей змішувачем-кормороздавачем / І.А. Шевченко, Е.Б. Алієв, С.О. Доруда // Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин: Кіровоградський національний технічний університет – Кіровоград, 2013. – Вип. 43, частина 1. – С. 202-207.
6. Доруда С.А. Автоматизированная система кормления животных на основе смесителя-кормораздатчика потокового типа / С.А. Доруда, Э.Б. Алиев // Научно-технический прогресс в сельскохозяйственном производстве: материалы Междунар. науч.-техн. конф.: в 3 т. / РУП «НПЦ НАН Беларуси по механизации сельского хозяйства». – Минск, 2014. – Т.3. – С.171-175.

7. Січкарь А.В. Стан і перспективи розвитку вівчарства та козівництва в Запорізькій області / А.В. Січкарь, Е.Б. Алієв, В.В. Лиходід // Інтенсифікація кормовиробництва – основа сталого розвитку галузі тваринництва (Збірник наукових праць, присвячений 150-тій річниці з дня організації Полтавського губернського земства та 85-річчю заснування Інституту свинарства і АПВ). – Полтава, 2015. – С. 71-74.

8. Доруда С.О. До оцінки якості роботи змішувача-кормороздавача потокового типу / С.О. Доруда, Е.Б. Алієв // Інтенсифікація кормовиробництва – основа сталого розвитку галузі тваринництва (Збірник наукових праць, присвячений 150-тій річниці з дня організації Полтавського губернського земства та 85-річчю заснування Інституту свинарства і АПВ). – Полтава, 2015. – С. 75-77.

9. Гаврильченко О.С. Обґрунтування конструктивно-технологічних параметрів бункера-дозатора комбікормів / О.С. Гаврильченко, С.Ю. Дерун, Е.Б. Алієв, С.О. Доруда // Технології АПК XXI століття: проблеми і перспективи розвитку: Зб. наукових-праць (17-18 травня 2018 року, м. Ніжин) / За наук. Ред. В.С. Лукача [та ін.]. – Ніжин, 2018 – С. 209-220.

10. Алієв Е.Б., Луц П.М., Верета В.В. (2019). Обґрунтування конструктивно-технологічної схеми роторно-кавітаційного диспергатора кормосумішей. Сучасні проблеми та технології аграрного сектору України: Зб. наукових-праць (21 листопада 2019) / За наук. Ред. В.С. Лукача [та ін.]. Ніжин. С. 17-25.

11. Алієв Е. Б., Кошулько В. С., Кочережко Н. В. Обґрунтування конструктивно-технологічних параметрів роторного змішувача комбікормів періодичної дії. Техніка, енергетика, транспорт АПК, 3 (122): 5–13. DOI: 10.37128/2520-6168-2023-3-1

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

агропромислового виробництва, 2 (216): 143–152. DOI: 10.37204/2786-7765-2023-2-15.

13. Алієв Е. Б., Лінко М. О. (2023). Експериментальні дослідження експандера кормів. Збірник тез доповідей XXIV Міжнародної наукової конференції «Сучасні проблеми землеробської механіки» (17–19 жовтня 2023 року). Національний університет біоресурсів і природокористування України: 229–232.

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

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

16. Алієв Е.Б., Лінко М.О. (2023). Результати чисельного моделювання формуючої насадки експандера кормів. Міжнародної науково-практичної конференції «Використання сучасних технологій та техніки в аграрному виробництві» (20-21 квітня 2023 р.): зб. наукових праць, ВП НУБіП України «Ніжинський агротехнічний інститут», 17–22.

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

18. Aghlmandi Harzanagh, A., Orhan, E.C., Ergun, S.L., Discrete element modelling of vibrating screens. Minerals Engineering, 2018, 121, 107-121.

19. Chen, Y.-h., Tong, X., Application of the DEM to screening process: a 3D simulation. Mining Science and Technology (China), 2009, 19(4), 493-497.

20. Cotabarren, I.M., Rossit, J., Bucalá, V., Piña, J., Modeling of an Industrial Vibrating Double-Deck Screen of a Urea Granulation Circuit. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2009, 48(6), 3187-3196.
21. Delaney, G.W., Cleary, P.W., Hilden, M., Morrison, R.D., Testing the validity of the spherical DEM model in simulating real granular screening processes. *Chemical Engineering Science*, 2012, 68(1), 215-226.
22. Djokovic, J., Tanikić, D., Nikolić, R., Kalinović, S., Screening Efficiency Analysis of Vibrosieves with the Circular Vibrations. *Civil and Environmental Engineering*, 2017, 13.
23. Dong, K.J., Yu, A.B., Brake, I., DEM simulation of particle flow on a multi-deck banana screen. *Minerals Engineering*, 2009, 22(11), 910-920.
24. Fernandez, J.W., Cleary, P.W., Sinnott, M.D., Morrison, R.D., Using SPH one-way coupled to DEM to model wet industrial banana screens. *Minerals Engineering*, 2011, 24(8), 741-753.
25. Jahani, M., Farzanegan, A., Noaparast, M., Investigation of screening performance of banana screens using LIGGGHTS DEM solver. *Powder Technology*, 2015, 283, 32-47.
26. Li, H., Li, Y., Gao, F., Zhao, Z., Xu, L., CFD–DEM simulation of material motion in air-and-screen cleaning device. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2012, 88(0), 111-119.
27. Li, Z., Tong, X., Zhou, B., Wang, X., Modeling and parameter optimization for the design of vibrating screens. *Minerals Engineering*, 2015, 83, 149-155.
28. Plassiard, J.-P., Belheine, N., Donze, F., A spherical discrete element model: Calibration procedure and incremental response. *Granular Matter*, 2009, 11, 293-306.
29. Soldinger, M., Influence of particle size and bed thickness on the screening process. *Minerals Engineering*, 2000, 13(3), 297-312.

30. Andersson, J., Almqvist, A., Larsson, R., Numerical simulation of a wear experiment. *Wear*, 2011, 271(11), 2947-2952.
31. Asbjörnsson, G., Bengtsson, M., Hulthén, E., Evertsson, M., Model of banana screen for robust performance. *Minerals Engineering*, 2015.
32. Choy, L.T., The strengths and weaknesses of research methodology: Comparison and complimentary between qualitative and quantitative approaches. *IOSR Journal of Humanities and Social Science*, 2014, 19(4), 99-104.
33. Cundall, P.A., Strack, O.D.L., A discrete numerical model for granular assemblies. *Géotechnique*, 1979, 29(1), 47-65.
34. Just, S., Toschkoff, G., Funke, A., Djuric, D., Scharrer, G., Khinast, J., Knop, K., Kleinebudde, P., Experimental analysis of tablet properties for discrete element modeling of an active coating process. *AAPS PharmSciTech*, 2013, 14(1), 402-411.
35. Lindroos, M., Apostol, M., Kuokkala, V.-T., Laukkanen, A., Valtonen, K., Holmberg, K., Oja, O., Experimental study on the behavior of wear resistant steels under high velocity single particle impacts. *International Journal of Impact Engineering*, 2015, 78, 114-112.
36. Maw, N., Barber, J.R., Fawcett, J.N., The oblique impact of elastic spheres. *Wear*, 1976, 38(1), 101-114.
37. Mills-Beale, J., You, Z., The mechanical properties of asphalt mixtures with Recycled Concrete Aggregates. *Construction and Building Materials*, 2010, 24(3), 230-235.
38. Soldinger, M., Transport velocity of a crushed rock material bed on a screen. *Minerals Engineering*, 2002, 15(1–2), 7-17.
39. Tavaréz, F.A., Plesha, M.E., Discrete element method for modelling solid and particulate materials. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 2007, 70(4), 379-404.

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

Чисельне моделювання вібраційного просіювача гранульованих кормів

Виконав: магістрант групи МГАІ-1-23
Коваленко Єгор Володимирович

Керівник: доктор філософії
Лупко Кристина Олегівна

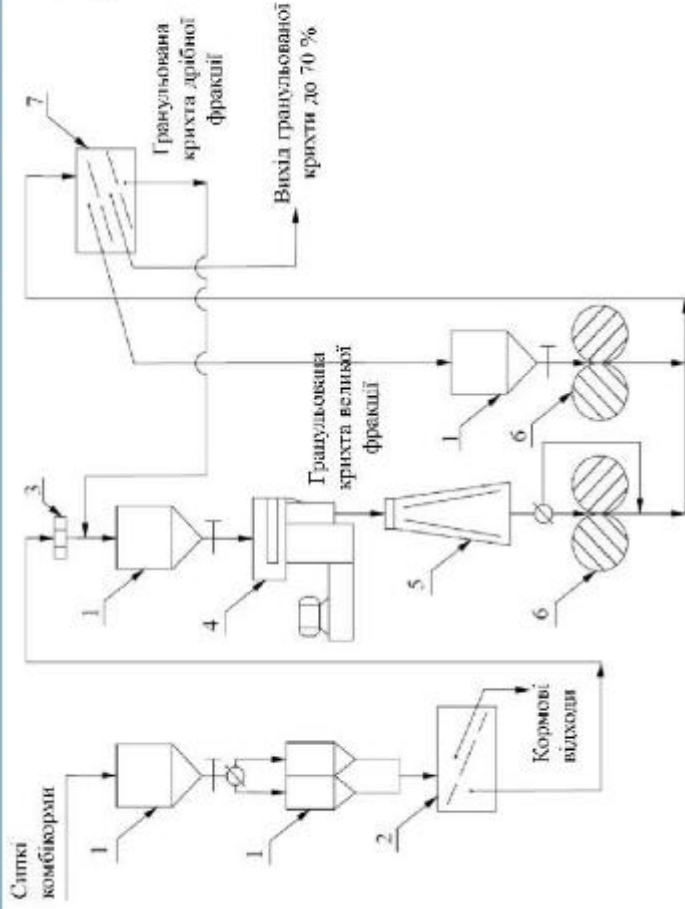
Дніпро, 2024

Додатки

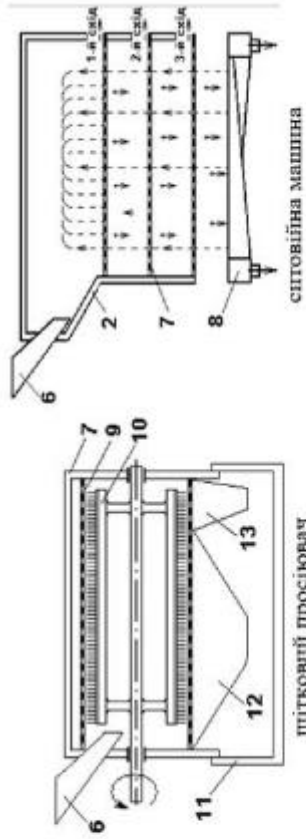
Мета досліджень – підвищення ефективності техніко-технологічного забезпечення виробництва гранульованих кормів, шляхом удосконалення конструкції просіювача із обґрунтованими конструктивно-технологічними параметрами.

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

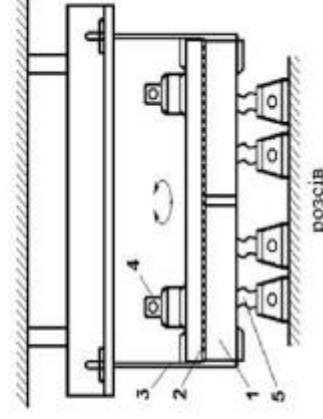
1. Провести аналіз сучасного стану та напрямів розвитку технологій виробництва гранульованих кормів, вивчити існуючі конструкції просіювачів та чисельні моделі процесу просіювання.
2. Розробити фізико-математичну модель процесу роботи вібраційного просіювача, визначивши критерії ефективності просіювання та апарат для моделювання.
3. Провести валідацію та верифікацію створеної моделі, оцінити її точність порівняно з експериментальними даними.
4. Виконати експериментальні дослідження процесу роботи вібраційного просіювача, оцінити вплив форми та матеріалу отворів сита, щільності матеріалу подачі та зношення ситового полотна на ефективність просіювання.
5. Провести оцінку економічної ефективності використання вібраційного просіювача, визначити основні економічні показники та виконати порівняльний аналіз з існуючими рішеннями.
6. Розробити заходи з охорони праці та безпеки в надзвичайних ситуаціях під час експлуатації вібраційного просіювача, оцінити ризики та запропонувати рекомендації для забезпечення безпечної роботи обладнання.



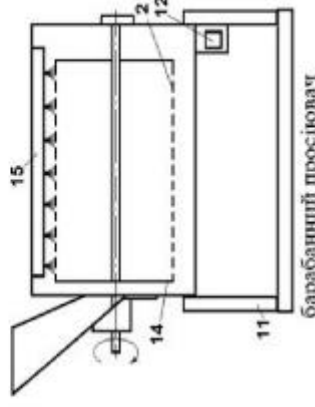
1 – бункер тимчасового зберігання; 2 – сепаратор для очищення; 3 – магнітний сепаратор; 4 – гранулятор; 5 – охолоджувач; 6 – дробарка; 7 – просіювач
Схема технології гранулювання комбікормів для отримання гранульованого крупного корму



ситковий просіювач



розсів



барабанний просіювач

1 – ситова рама; 2 – сито; 3 – трос; 4 – приймальний рукав; 5 – випускний рукав; 6 – лійка; 7 – корпус; 8 – вивантажувальний короб; 9 – решето; 10 – шітковий барабан; 11 – рама; 12 – вивантажувальне вікно; 13 – вивантажувальна горловина; 14 – барабан; 15 – шітка
Класифікація конструктивних схем просіювачів гранул



Просіювачі гранул ПГВ
КБ «Дорошенко»

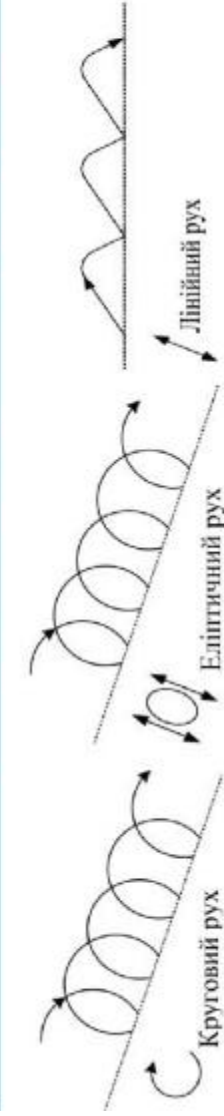


Просіювач
ТОВ «Стройтехнік»

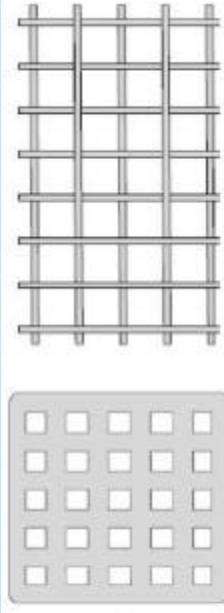


Просіювачі гранул
ГТП ІСК Group

**Загальні вигляди
деяких вібраційних
просіювачів гранул**



Схематичне зображення різних типів руху

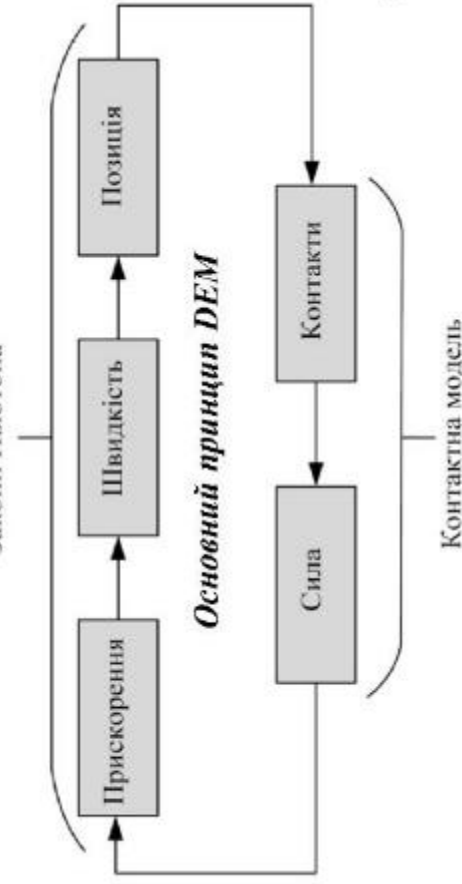


Ілюстрація схематичного вигляду панелі (ліворуч) і дротяної сітки (праворуч)

де e – це відсоток дрібного матеріалу у вихідній сировині, v – це відсоток дрібного матеріалу у відсіяному продукті, O – масовий потік великого продукту, а F – масовий потік вихідного матеріалу до сита

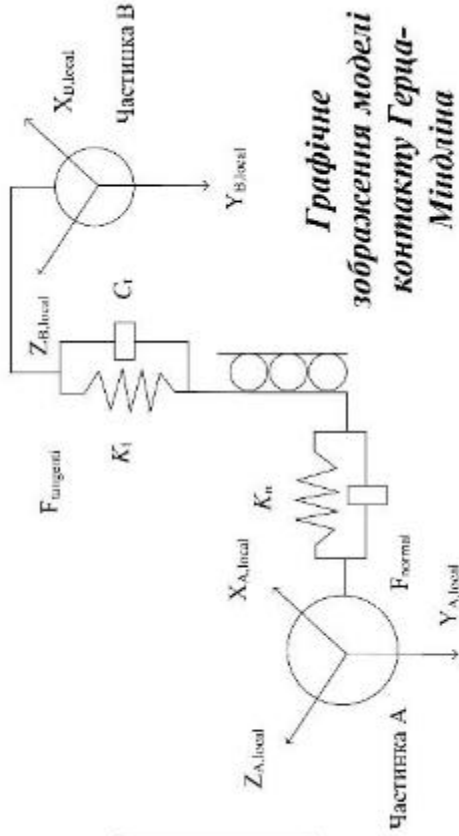
$$E_U = \frac{e - v}{e(1 - v)} \quad E_O = \frac{O(1 - v)}{F(1 - e)}$$

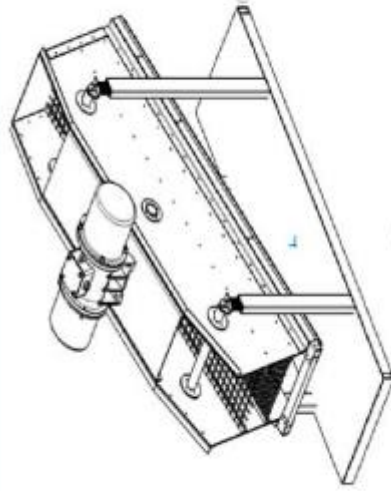
Закони Ньютона



Нормальна та дотична сили

$F_n = -K_n \Delta x + C_n V_n$ де K_n – жорсткість на нормаль, U_n – нормальне перекриття зміщення, а p_i – одиничний вектор; K_n – еластична постійна для нормального контакту, Δx – відстань між двома частинками, C_n – в'язкоеластична демпфіруюча постійна для нормального контакту, а V_n – нормальна швидкість частинок; K_t – еластична постійна для дотичного контакту, Δx – вектор дотичного зміщення між двома сферичними частинками, C_t – в'язкоеластична демпфіруюча постійна для нормального контакту, а V_t – дотична швидкість частинок



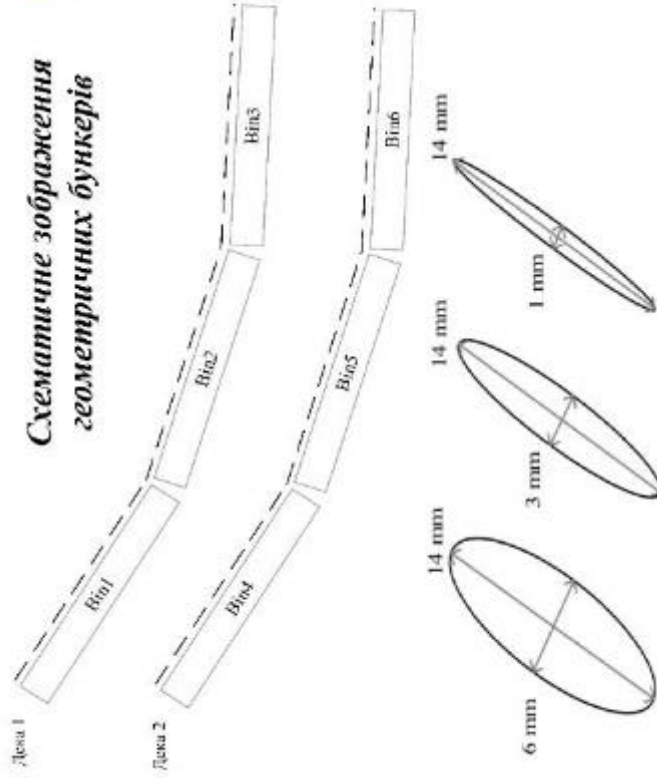


Вигляд CAD моделі просіювача

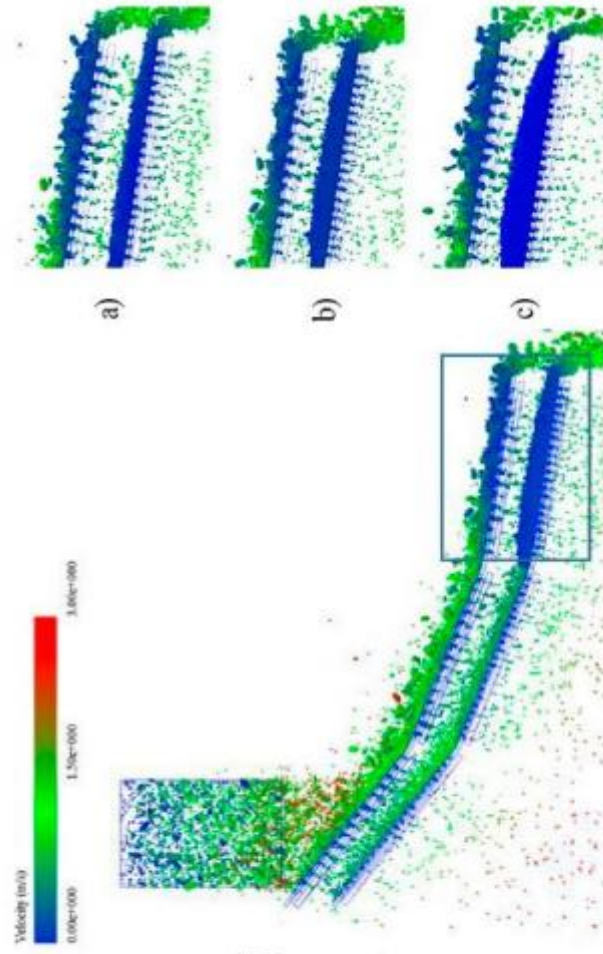
Геометричні та експлуатаційні параметри лабораторного просіювача

Параметри	Значення
Довжина просіювача	1500 mm
Ширина просіювача	300 mm
Розмір отворів	10 x 10 – 25 x 25 mm
Діаметр дроту	2,5 mm
Матеріал ярусів	Сталь
Нахил	15°
Амплітуда	1,5 до 9,5 mm
Рух вібрації	Лінійний

Схематичне зображення
геометричних бункерів

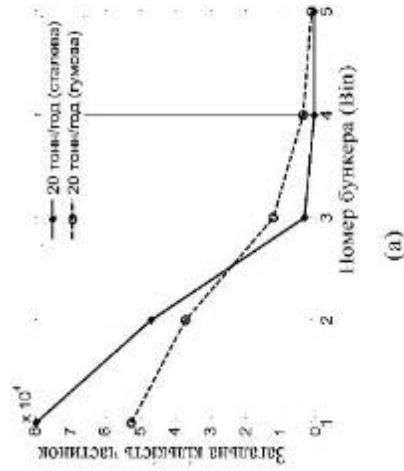


Зображення різних амплітуд, використаних у
симуляціях з еліптичним рухом
Зліва направо: 6 мм, 3 мм і 1 мм

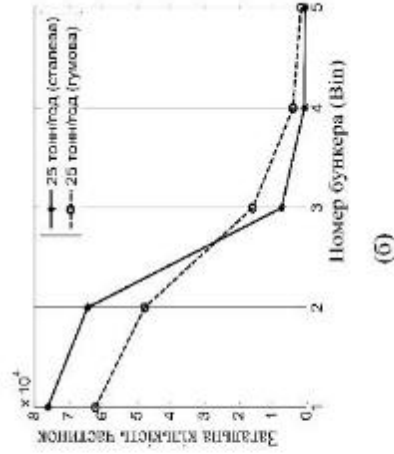


Ілюстрація симуляції після 12 секунд:

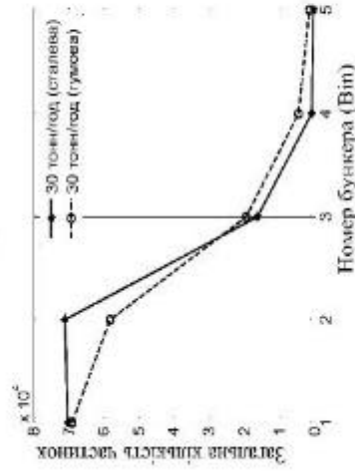
- а) еліптичний рух з амплітудою 6 мм;
- б) еліптичний рух з амплітудою 3 мм;
- в) еліптичний рух з амплітудою 1 мм



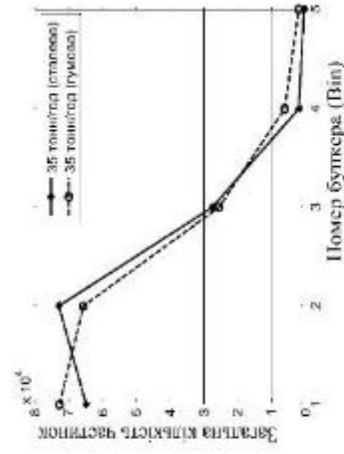
(а)



(б)

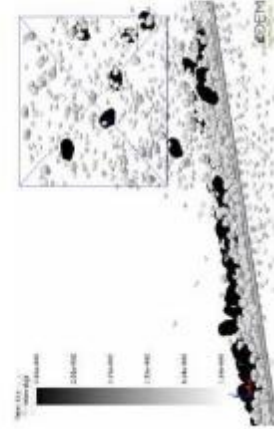


(в)

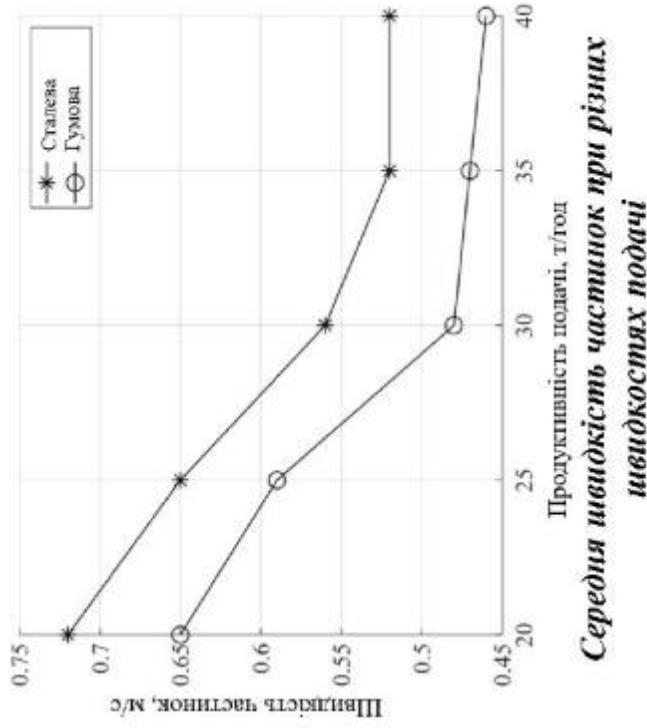


(г)

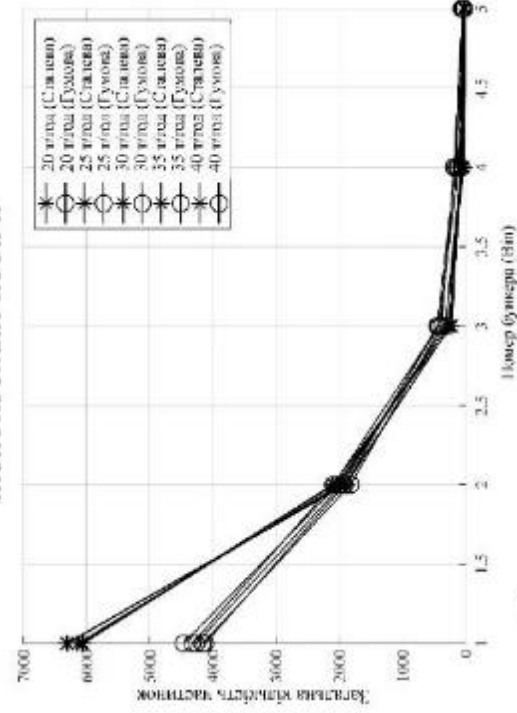
Аналіз продуктивності екранування по довжині екрана



Шар частинки при подачі 20 т/год (а) і 35 т/год (б)

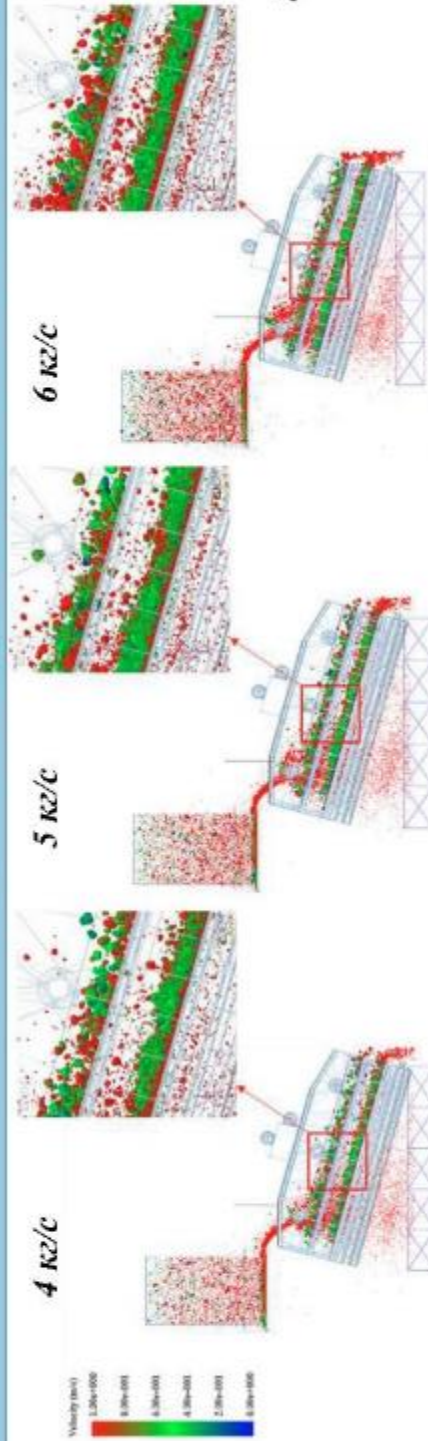


Середня швидкість частинок при різних швидкостях подачі

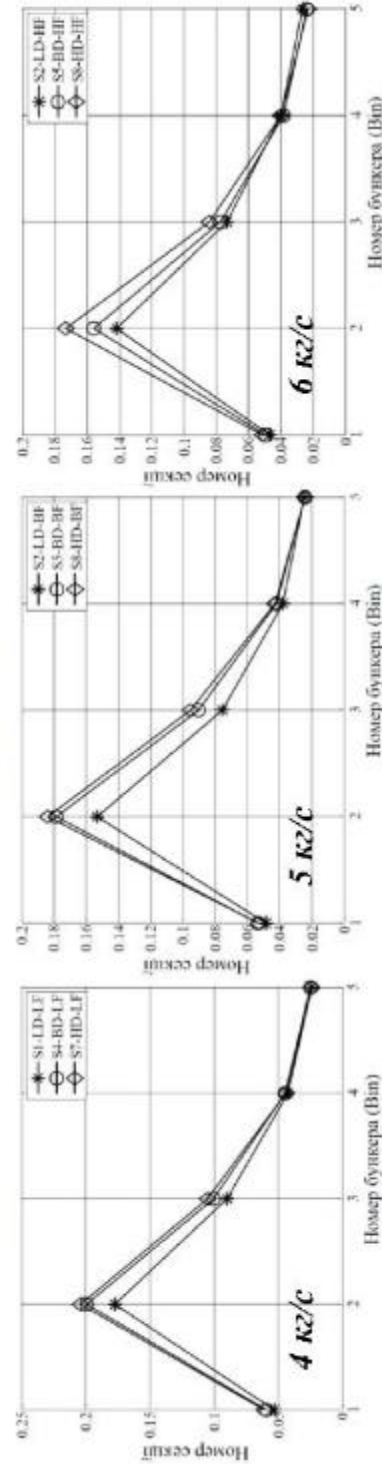


Відстеження проходження частинки типу 2 уздовж екрану

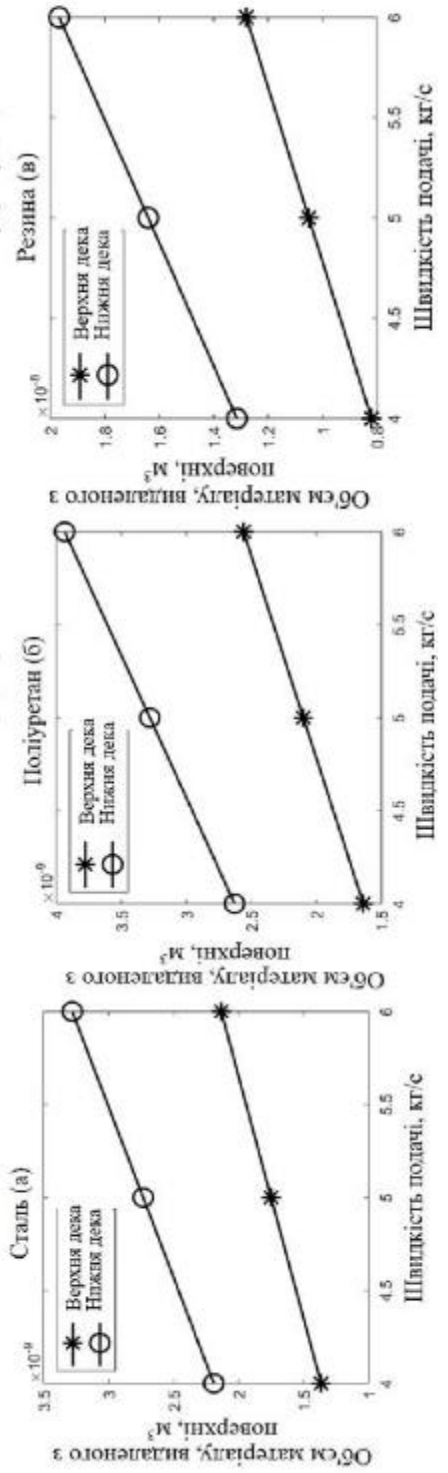
Результати моделювання методом дискретних елементів (DEM) для процесу вібраційного просіювання з трьома різними швидкостями подачі



Швидкість проходження в різних секціях сита для різних щільностей швидкості подачі



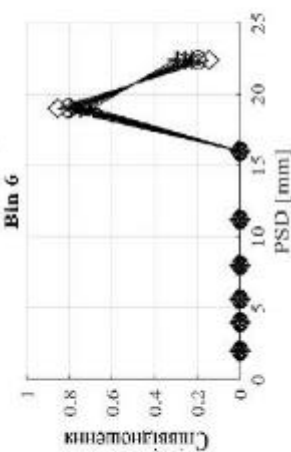
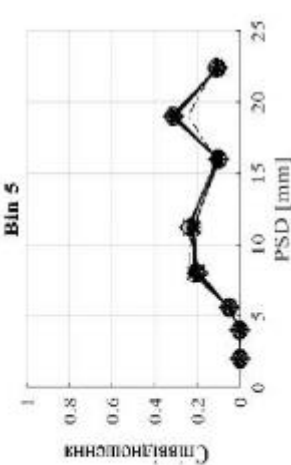
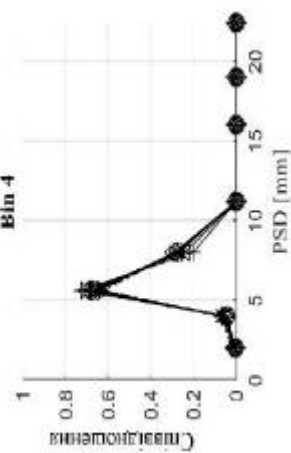
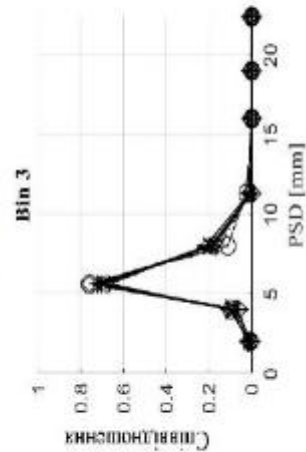
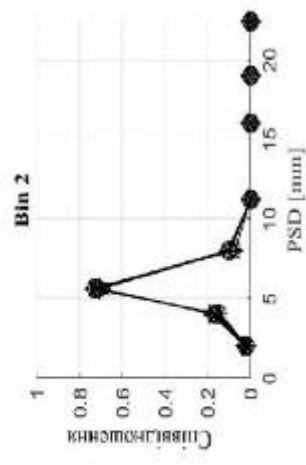
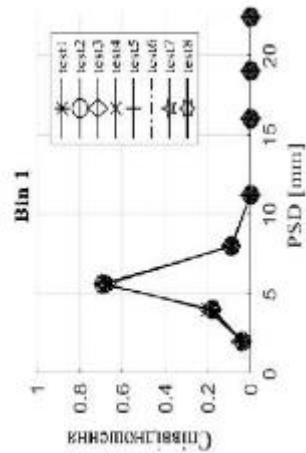
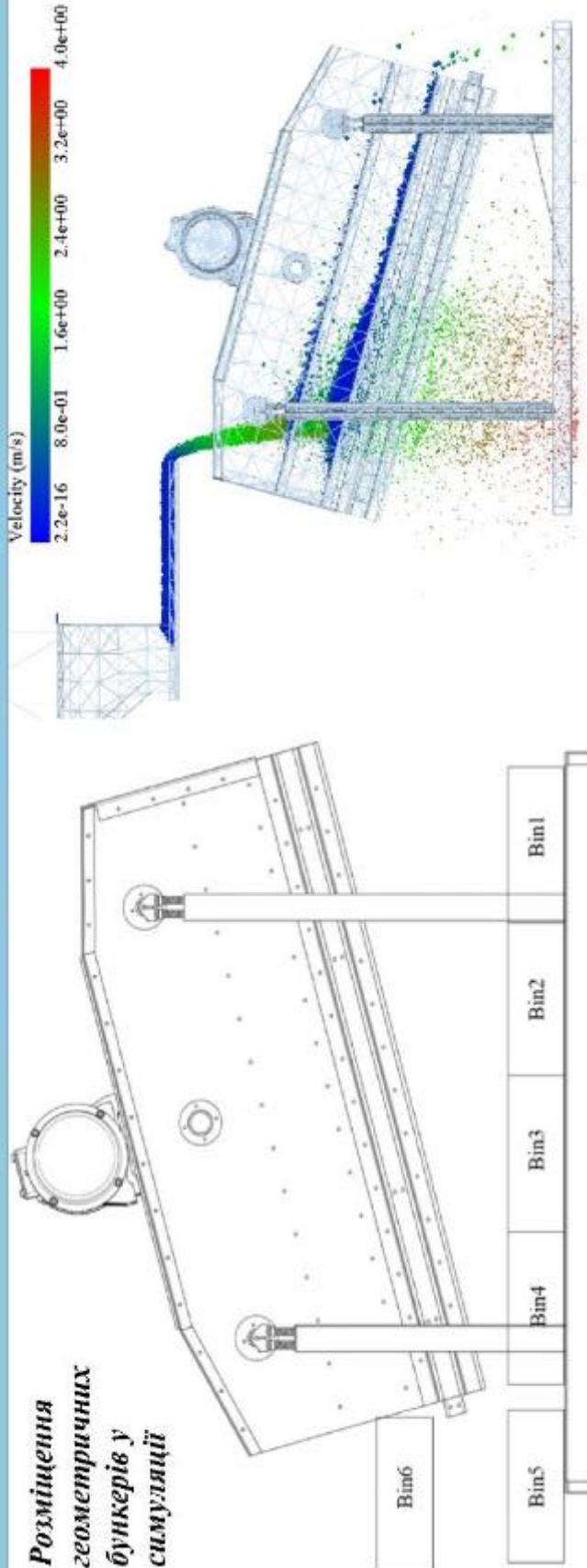
Об'єм матеріалу, видаленого з верхніх різними швидкостями подачі



Результати чисельного моделювання

8

Розміщення
геометричних
бункерів у
симуляції



Розподіл
частинки за
розмірами
(PSD) з
кожного
бункера

Показник	Базовий варіант (ЦМА)	Проектований вібропросіовач	Різниця
Продуктивність обладнання, кг/год	1000	1200	200
Річна кількість робочих годин	10000	8333	-1667
Витрати на оплату праці, грн./т	109,76	91,46	-18,3
Витрати на електроенергію, грн./т	16,26	15,49	-0,77
Амортизаційні витрати, грн./т	3,00	3,75	+0,75
Витрати на ремонт і ТО, грн./т	3,00	3,75	+0,75
Загальні питомі витрати, грн./т	132,62	113,40	-19,22
Прямі річні витрати, грн.	1 326 200	1 134 000	-192 200
Балансова вартість обладнання, грн.	200 000	250 000	50 000
Економічний ефект, грн./рік	-	192 200	192 200
Термін окупності додаткових вкладень, роки	-	0,26	-

1. Оптимізація процесу виробництва комбікормів і підвищення продуктивності тваринництва досягається через вдосконалення технологій гранулювання та використання сучасних вібраційних просіювачів. Це дозволяє знизити енерговитрати, покращити якість комбікормів та зменшити їх втрати, що, у свою чергу, підвищує продуктивність тварин і знижує загальну собівартість продукції, забезпечуючи економічну ефективність виробництва.
2. Оптимізація процесу просіювання потребує всебічного аналізу впливу різних параметрів, що забезпечує високу якість кінцевого продукту та ефективність роботи обладнання. Застосування DEM-симуляцій та лабораторних випробувань дозволяє точно моделювати поведінку частинок і налаштовувати ключові параметри для максимізації продуктивності просіювання. Фізико-математичні моделі, такі як модель Карри та метод дискретних елементів (DEM), є важливими інструментами для точного прогнозування та оптимізації процесу.
3. Валідація та верифікація моделі просіювання підтвердили її здатність точно відображати фізичні процеси, що відбуваються під час роботи обладнання, дозволяючи використовувати результати для промислових застосувань. Використання DEM-симуляцій та лабораторних експериментів допомогло детально проаналізувати вплив параметрів, таких як амплітуда руху та знос поверхні, на ефективність просіювача. Отримані результати сприяють оптимізації конструкції просіювальних систем, підвищенню їх продуктивності та зниженню витрат на обслуговування.
4. Ефективність процесу просіювання значною мірою залежить від матеріалу сита, кількості отворів та швидкості подачі матеріалу. Металеві сита показують високі результати на початкових етапах, однак при збільшенні швидкості подачі гумові та поліуретанові панелі стають ефективнішими завдяки сприянню стратифікації частинок. Крім того, матеріали з високою щільністю проходять крізь сито швидше, але при підвищеній швидкості подачі процес стратифікації сповільнюється через збільшення товщини шару. Зношування сит також залежить від матеріалу сита і навантаження, причому сталь швидше піддається зносу в зонах із високою швидкістю частинок. Поліуретанові та гумові панелі рекомендуються для зменшення зносу. Оптимізація процесу досягається шляхом регулювання швидкості подачі та амплітуди вібрацій для покращення стратифікації і використання площі сита, що дозволяє підвищити ефективність просіювання.
5. Аналіз організації робочого місця вібропросіювача комбікормів виявив, що основними аспектами, які потребують уваги з точки зору безпеки, є стан технічного обладнання, запиленість повітря, рівень шуму та дотримання електробезпеки. Недотримання вимог може призвести до травм, професійних захворювань та інших негативних наслідків для здоров'я працівників.
6. Результати аналізу економічної ефективності показують, що впровадження вібропросіювача для гранульованих кормів дозволяє знизити питомі річні експлуатаційні витрати і отримати річний економічний ефект у 192200 грн. Окупність нової машини становить 0,26 року, що свідчить про доцільність її використання.