

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

Пояснювальна записка
до дипломної роботи
освітнього ступеня "Магістр" на тему:
Чисельне моделювання стрічкового змішувача кормів

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

_____ Коломієць Олександр Михайлович

Керівник: _____ Алієв Ельчин Бахтияр огли

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**

Коломійцю Олександрю Михайловичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи: Чисельне моделювання стрічкового змішувача кормів

керівник роботи: Алієв Ельчин Бахтияр огли, д-р техн. наук, старший дослідник

(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 забезпечення 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. Фізико-математичний апарат чисельного моделювання. 3. Методика чисельного моделювання стрічкового змішувача кормів. 4. Результати чисельного моделювання стрічкового змішувача кормів. 5. Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях. 6. Економічна ефективність стрічкового змішувача кормів. Висновки. Список використаних джерел. Додатки

5. Перелік демонстраційного матеріалу

1. Тема. Мета і задачі досліджень (2 аркуша, А4). 2. Стан і напрями досліджень (1 аркуш, А4). 3. Аналітичні дослідження (1 аркуш, А4). 4. Методика моделювання (1 аркуш, А4). 5 Результати моделювання (3 аркуша, А4). 6. Економічні показники (1 аркуш, А4). 7. Висновки (1 аркуш, А4)

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
1-6	Алієв Е. Б., професор	12.11.2024	09.12.2024
Нормоконтроль	Івлєв В. В., доцент	06.12.2024	09.12.2024

7. Дата видачі завдання: 12 листопада 2024 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломного 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

_____ Коломієць О. М.

(підпис)

(прізвище та ініціали)

Керівник роботи

_____ Алієв Е. Б.

(підпис)

(прізвище та ініціали)

Коломієць О. М. Чисельне моделювання стрічкового змішувача кормів. Випускна кваліфікаційна робота на здобуття освітнього ступеня «Магістр» за спеціальністю 208 «Агроінженерія». ДДАЕУ, Дніпро, 2024.

У першому розділі представлено огляд сучасних технологій приготування комбикормів та процесів змішування гранульованого матеріалу. Описано індекси змішування, що використовуються для оцінки якості процесу, та проведено класифікацію змішувального обладнання. Другий розділ присвячений фізико-математичному апарату чисельного моделювання з використанням методу дискретних елементів (DEM). Описано керуючі рівняння та особливості поведінки когезивних і несферичних частинок у процесі змішування. У третьому розділі наведено методику чисельного моделювання стрічкового змішувача кормів. Зокрема, викладено постановку задачі та проведено статистичний аналіз віртуального експерименту з використанням методу DEM. Четвертий розділ містить результати чисельного моделювання. Вивчено вплив різних факторів, таких як рівень заповнення змішувача, швидкість обертання лопаток, густина та розмір частинок, на процес змішування. Визначено залежність якості змішування від зазначених факторів. П'ятий розділ стосується охорони праці та безпеки в умовах надзвичайних ситуацій. Шостий розділ присвячений економічній ефективності використання стрічкового змішувача кормів. Проаналізовано економічні вигоди від використання удосконаленої конструкції та наведено розрахунки строку окупності капіталовкладень.

Ключові слова: корм, приготування, стрічковий змішувач, параметри, ефективність, моделювання, симуляція.

Апробація. Коломієць О. М. (2024). Чисельне моделювання стрічкового змішувача 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, 131–133.

ЗМІСТ

ВСТУП	7
1 СТАН І НАПРЯМИ ДОСЛІДЖЕНЬ	9
1.1 Технології приготування комбікормів	9
1.2 Поведінка гранульованого матеріалу під час змішування	10
1.3 Індекси змішування	13
1.4 Класифікація змішувального обладнання	16
1.5 Висновки з розділу	23
2 ФІЗИКО-МАТЕМАТИЧНИЙ АПАРАТ ЧИСЕЛЬНОГО МОДЕЛЮВАННЯ..	26
2.1 Керуючі рівняння методу дискретних елементів (DEM).....	26
2.2 Дослідження DEM поведінки взаємодії когезивних частинок	26
2.3 Дослідження DEM поведінки взаємодії несферичних частинок.....	30
2.4 Висновки з розділу	34
3 МЕТОДИКА ЧИСЕЛЬНОГО МОДЕЛЮВАННЯ СТРІЧКОВОГО ЗМІШУВАЧА КОРМІВ.....	36
3.1 Постановка задачі	36
3.2 Статистичне проектування та аналіз віртуального експерименту DEM ...	38
3.3 Висновки з розділу	39
4 РЕЗУЛЬТАТИ ЧИСЕЛЬНОГО МОДЕЛЮВАННЯ СТРІЧКОВОГО ЗМІШУВАЧА КОРМІВ.....	41
4.1 Вплив рівня заповнення на поведінку змішування.....	41
4.2 Вплив швидкості обертання лопаток на поведінку змішування	46
4.3 Вплив густини частинок на поведінку змішування	49
4.4 Вплив розміру частинок на поведінку змішування	53
4.5 Залежність якості змішування від факторів досліджень	58
4.6 Висновки з розділу	61
5 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ	62
6 ЕКОНОМІЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ СТРІЧКОВОГО ЗМІШУВАЧА КОРМІВ.....	65
ВИСНОВКИ.....	67
Бібліографія	69
Додатки	74

ВСТУП

Підвищення ефективності аграрного виробництва можливе лише за умов високої продуктивності тварин, що значною мірою залежить від збалансованого харчування. Для цього в раціони вводяться готові комбікорми, премікси, а також білкові, вітамінні та мінеральні добавки. Однак придбання таких продуктів супроводжується додатковими витратами на транспортування, що збільшує собівартість кінцевої продукції та залишає невикористаними власні ресурси. Тому доцільніше виробляти комбікорми безпосередньо на місці їх використання. Виробництво комбікормів поєднує різні галузі сільського господарства (землеробство, тваринництво, аграрний сектор), а також має значний потенціал для розвитку, включаючи екологічні аспекти та управління ресурсами.

Останньою стадією у процесі виготовлення комбікормів є змішування. Існуючі засоби для змішування сипучих кормів часто не забезпечують достатньої однорідності сумішей. Зоотехнічна важливість полягає не лише у правильному дозуванні компонентів, а й у рівномірному їх розподілі в об'ємі суміші, що забезпечує стабільну поживну цінність у кожній порції корму.

Наразі питання виробництва якісних комбікормів є пріоритетним для сільськогосподарських підприємств, що вимагає використання сучасного вискоєфективного обладнання, зокрема змішувачів. Ефективне змішування є важливим етапом цього процесу. Одним з поширених методів змішування є обертання змішувача, рух лопатей, проходження суміші через сопла зі стисненим повітрям або рідиною, використання вібрацій чи ультразвуку. Проте існуючі технічні рішення не завжди гарантують високу однорідність змішування на мікрорівні. У сучасних розробках нових змішувачів сухих кормових сумішей надається перевага роторним змішувачам. Проведений аналіз свідчить про недостатню кількість досліджень процесу змішування у роторних змішувачах періодичної дії.

Метою цього дослідження є вдосконалення технічного засобу для змішування сипучих компонентів комбікормів шляхом визначення оптимальних параметрів роботи стрічкового робочого органу для підвищення ефективності цього процесу.

Для досягнення цієї мети поставлено такі завдання: розробити модель процесу змішування, розробити методику і провести чисельне моделювання процесу змішування в стрічковому змішувачі, а також провести техніко-економічне обґрунтування доцільності використання розробки.

Об'єктом дослідження є стрічковий змішувач періодичної дії, а предметом – закономірності його робочого процесу. Для досліджень застосовувалися чисельні методи моделювання в Simcenter Star-CCM+, статистичний аналіз, зокрема дисперсійний і кореляційний.

1 СТАН І НАПРЯМИ ДОСЛІДЖЕНЬ

1.1 Технології приготування комбикормів

Наразі спостерігається зростання інтересу до самостійного виготовлення комбикормів безпосередньо на фермах, оскільки це більш економічно вигідно — вартість комбикормів значно нижча. Невеликі господарства активно використовують малосерійні установки для виготовлення повноцінних комбикормів із доступних компонентів за стандартними або спеціально розробленими агрономічними рецептами. Такі комплекси набули популярності через їхню доступність і швидке повернення інвестицій. Основним напрямком розвитку цих установок є зменшення енерговитрат і використання металу, без втрати якості готового продукту.

Існує декілька основних підходів до технології виробництва комбикормів: формування попередньої суміші зернової, білкової та мінеральної сировини з повторним дозуванням; поетапне приготування всіх компонентів із одноразовим дозуванням (класична схема); змішування без необхідності повторного дозування; лінійний метод.

У фермерських умовах найбільш доцільним є застосування технології з попереднім змішуванням зернових, білкових і мінеральних компонентів у кілька етапів. Такий підхід забезпечує точність дозування та підвищує якість комбикорму, хоча й ускладнює процес виробництва через необхідність повторного дозування.

У будь-якій технологічній схемі змішування сухих кормових сумішей необхідним елементом є використання змішувача. Основна мета цього обладнання — досягти однорідності суміші з мінімальними енерговитратами. Змішування — це механічний процес, у якому частинки окремих компонентів рівномірно розподіляються по всьому об'єму під дією зовнішніх сил, що дає можливість отримати однорідну консистенцію.

Для різних типів змішувачів оптимальний час змішування та параметри роботи можуть варіюватися залежно від фізико-механічних властивостей компонентів і режиму роботи обладнання.

1.2 Поведінка гранульованого матеріалу під час змішування

Оскільки в більшості випадків процес змішування додає значну цінність продукту, його можна вважати ключовою операцією в загальному технологічному процесі. Раціональні та ефективні методи і технології для контролю змішування та розділення частинок і досягнення швидкого та рівномірного змішування не тільки дозволяють суттєво економити енергію та знижувати витрати на обробку, але й сприяють розвитку механіки частинок.

Механізм змішування. Поглиблене дослідження механізму змішування та ефективності змішування частинок є важливим для надання рекомендацій щодо виробничих операцій та оптимізації обладнання в індустрії гранульованих матеріалів. Хоча мета змішування частинок варіюється від одного промислового процесу до іншого, механізм змішування загалом однаковий і включає три основні механізми (рис. 2.1).

Конвекційне змішування. Виникає завдяки переміщенню частинок у вигляді згустків, які зсуваються відносно один одного під дією змішувача. Ці згустки обираються для кожного переміщення та потім переміщуються в інше місце змішувача. Таким чином, покращується просторова однорідність та збільшується площа контакту між компонентами. Розмір згустків не залежить від геометрії змішувача і не оцінюється з точки зору механіки потоку.

Дифузійне змішування. Вважається процесом, який сприяє змішуванню на масштабі довжини частинок у змішувачі. Дифузійне змішування спричинене випадковим рухом. Швидкість змішування за цим механізмом є нижчою порівняно з конвекційним змішуванням, але дифузійне змішування є важливим для мікроскопічної гомогенізації.

Змішування за рахунок зсуву. Цей механізм визнає, що сипучі порошки зазнають конвекції через утворення вузьких зон, так званих зон ковзання, де градієнт швидкості є високим. За межами цих зон цілі тіла частинок рухаються майже як блоки. Механізм пов'язаний із конвекцією та високими зсувними

деформаціями в порошку, що збільшує площу контакту двох груп частинок і розбиває агломерати.

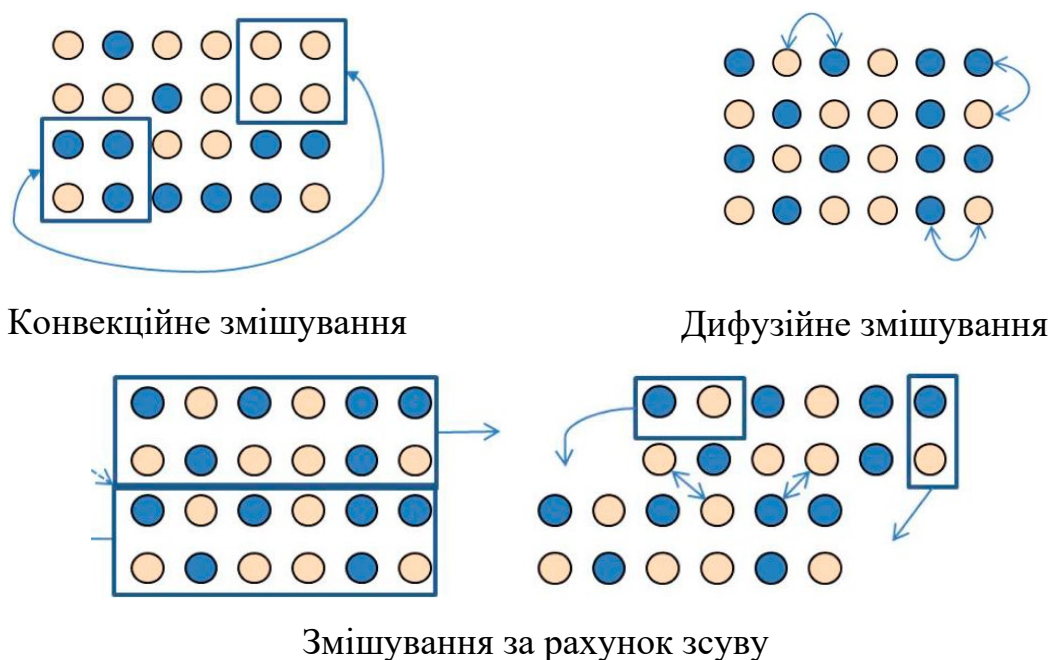


Рисунок 2.1 – Конвекційний, дифузійний та зсувний механізми перемішування

Змішування сипкого матеріалу відбувається в змішувачі, де одночасно реалізуються всі три механізми, описані вище. Характеристична крива змішування – це графік ступеня змішування M (у логарифмічному масштабі) проти часу змішування t (у лінійному масштабі) на рис. 2.2. Як правило, конвекційне змішування домінує на початковій стадії (I). Різке зниження на початку пояснюється перевагою конвекційного механізму через переміщення блоків частинок, наприклад, на масштабі лопатей. Змішування продовжується стабільно як за конвекційним, так і за зсувним механізмом на проміжній стадії (II). Коли масштаб неоднорідних зон у суміші є меншим за блоки частинок, конвекція більше не є ефективною у зменшенні стандартного відхилення. В результаті, дифузія стає домінуючим механізмом і буде відповідальна за подальше зниження кривої та досягнення однорідної суміші. Коли час змішування достатньо довгий, стандартне відхилення досягає мінімального значення та коливається навколо нього на кінцевій стадії (III). Однак фактичний процес змішування частинок у промисловому виробництві набагато

складніший, ніж показано на рис. 2.2. Точний та детальний опис стану змішування та механізму змішування гранульованих матеріалів є важливим, але наразі в цьому напрямку немає проривних досягнень.

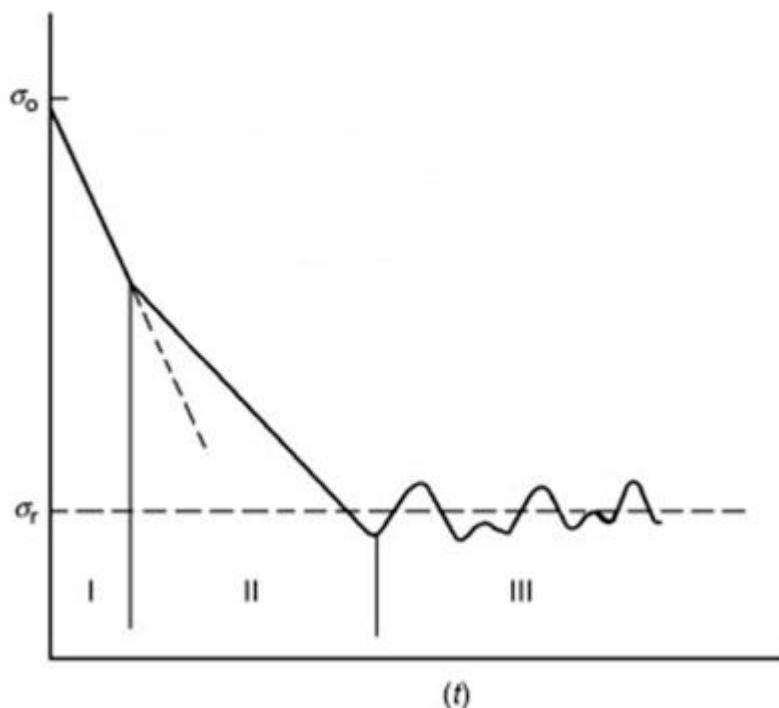


Рисунок 2.2 – Схематичне зображення характеристичної кривої процесу змішування [5, 11].

Оцінка однорідності суміші. Для процесів змішування першим важливим питанням є те, наскільки добре змішана тверда суміш. Хоча ідеальне змішування є бажаним у багатьох процесах, його досягнення неможливе через схильність частинок до сегрегації, дифузії та конвекції. Сегрегація виникає, коли система містить частинки різного розміру або щільності, або коли застосовуються вибіркові сили. Для розуміння однорідності твердої суміші зазвичай використовується індекс змішування, щоб виміряти ступінь змішування. Індекс змішування є важливим параметром для оцінки стану змішування. Як правило, значення 1 вказує на повністю змішаний стан, а значення 0 — на повністю сегрегований стан. Точний і загальний індекс має бути максимально тісно пов'язаний з оцінкою однорідності кінцевих продуктів суміші, бути незалежним від процесів змішування та легко визначатися.

1.3 Індекси змішування

Індекси на основі дисперсії включають такі індекси, як коефіцієнт зниження дисперсії (VRR), дисперсія бімодальних бінових підрахунків (VBBC), відносне стандартне відхилення (RSD), індекс Лейсі (LI), індекс змішування-сегрегації (MSI), інтенсивність сегрегації (ESI), ступінь змішаності (DM) та змішувальна ентропія (ME), які оцінюють дисперсію розподілу трасувальних частинок під час змішування. Основним недоліком індексів змішування, що використовують стандартне відхилення або дисперсію, є те, що вони страждають від нестачі статистичної точності у системах з недостатньою кількістю зразків. Крім того, вони змінюються залежно від розміру вибірки. Тому розмір сітки потрібно правильно вибирати залежно від масштабу дослідження порошкової системи, щоб балансувати між мікрозмішуванням і макрозмішуванням у межах кожної сітки.

Індекс Лейсі — один із найперших індексів змішування, розроблений Лейсі у 1954 році [9], шляхом поділу області на N клітинок. Цей індекс змішування використовує оцінку дисперсії кількості частинок у кожній клітинці порівняно з середнім значенням, показаним нижче, де N відповідає загальній кількості сіток:

$$M = \frac{\sigma_0^2 - \sigma^2}{\sigma_0^2 - \sigma_r^2} \quad (1.1)$$

$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N-1} \cdot \sum_{i=1}^N (x_i - x_m)^2}$ є стандартним відхиленням між зразками, де x_i відповідає частці частинок у кожній сітці, а x_m — середнє значення частки частинок у всіх сітках.

$\sigma_0 = \sqrt{x_m(1-x_m)}$ є стандартним відхиленням у повністю сегрегованому стані до змішування, а x — концентрація цільових частинок у суміші.

$\sigma_r = \sqrt{x_m(1-x_m)/N_s}$ є стандартним відхиленням суміші в стані повної випадковості, де N_s — середній розмір вибірки.

Зміна M з часом залежить від обраного індексу змішування, оскільки індекси є різними функціями від σ . Крім того, зміни у σ при повністю змішаному стані можуть суттєво вплинути на зміни в M , залежно від індексу.

Коефіцієнт зниження дисперсії (VRR). Метод коефіцієнта зниження дисперсії [12] також широко використовується для оцінки змішування, використовуючи зміну кількості різних типів частинок у кожній сітці. VRR — це співвідношення між дисперсією на вході та виході. Тому цей індекс може використовуватися для порівняння системи змішування з початковим станом і для оцінки того, наскільки дисперсія на вході може бути усунена шляхом змішування в одиниці. VRR можна оцінити за наступними рівняннями:

$$VRR = \frac{\sigma_{in}^2}{\sigma_{out}^2} \quad (1.2)$$

$$\sigma_{in}^2 = \sigma_{out}^2 = \left(\frac{1}{N}\right) \cdot \sum_{i=1}^N (x_i - x_m)^2 \quad (1.3)$$

Відносне стандартне відхилення (RSD). Індекс відносного стандартного відхилення широко застосовується у багатьох роботах для оцінки ступеня змішування. Він залежить від сітки і обчислює стандартне відхилення концентрації часток у кожній сітці, поділене на середню концентрацію в усіх сітках.

$$RSD = \frac{\sigma}{C_m} \quad (1.4)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (C_i - C_m)^2}{N - 1}} \quad (1.5)$$

де C_i відповідає кількості часток певного типу в сітці i , а C_m — середній кількості часток в усіх сітках (N).

Змішана ентропія (ME). Індекс змішаної ентропії використовує концепцію ентропії для оцінки стану змішування. Цей індекс залежить від частки кількості часток кожного типу, присутніх у кожній сітці. Ентропія кожної сітки визначається як $e(k)$ і обчислюється так:

$$e(k) = x_1(k) \ln(x_1(k)) + x_2(k) \ln(x_2(k)) \quad (1.6)$$

де x_1 — частка кількості часток типу i у сітці k . Далі індекс ME можна обчислити так:

$$ME = \left(\frac{1}{N}\right) \cdot \sum_{i=1}^N e(k, t) \cdot n(k, t) \quad (1.7)$$

тут $e(k, t)$ — ентропія, а $n(k, t)$ — кількість часток у сітці k в момент часу t , а N відповідає загальній кількості сіток.

Індекси змішування на основі контактів. Індекси змішування на основі контактів вимірюють контакти часток для оцінки стану змішування. Цей підхід розділяє контакти однакових і різних типів часток. До цієї категорії належать індекси, такі як індекс сегрегації (SI), індекс на рівні частки (PS), метод найближчого сусіда (NNM) і число координації (CN).

Число координації (CN) — це кількість контактних точок на одну частку. Використовується середнє миттєве число координації між різними типами часток, яке змінюється з часом для вимірювання щільності часткового шару під час змішування:

$$CN = \frac{C_{AB}}{C_{AA} + C_{BB}} \quad (1.8)$$

Цей індекс варіюється від 0 (не змішаний стан) до 1 (повністю змішаний стан).

Індекс сегрегації (SI) порівнює кількість контактів різних типів часток (C_{AB}) з загальною кількістю контактів одного типу часток:

$$SI = \frac{C_{AA}}{C_{AA} + C_{AB}} + \frac{C_{BB}}{C_{BB} + C_{AB}} \quad (1.9)$$

Значення SI може варіюватися від 2 (повністю сегрегований стан) до 0 (змішаний стан).

Індекс на рівні частки (PS) використовує різницю у фракціях часток. Він враховує число координації кожної частки ($C_{n,i}$), а також різнокольорових часток у контакті ($C_{n,b}$):

$$x_i = \frac{C_{n,b}}{C_{n,i} + 1} \quad (1.10)$$

PS обчислюється за формулами:

$$PS = \frac{\sigma_0^2 - \sigma^2}{\sigma_0^2 - \sigma_r^2} \quad (1.11)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N (x_i - x_m)^2} \quad (1.12)$$

Метод найближчого сусіда (NNM). Цей метод використовує кількість сусідів різного кольору навколо частки. Оцінка змішування проводиться за формулою:

$$NNM = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{2 \cdot n_{diff}}{n_{nb}} \quad (1.13)$$

де n_{diff} — кількість сусідів іншого кольору n_{nb} — кількість сусідів для кожної частки.

1.4 Класифікація змішувального обладнання

Багато впливаючих факторів потрібно враховувати при виборі змішувача для різних промислових процесів: якість суміші, сегрегація частинок, модифікація частинок, чутливість порошку до зрізу, змішувач з низьким або високим енергетичним внеском, температура змішувача, кількість стадій змішування, безперервний чи партійний процес, вартість змішувача та легкість очищення [6]. Змішувачі для гранульованих матеріалів і порошків можна поділити на 3 класи: партійні, безперервні та напівпартійні (або напівбезперервні), подібно до будь-якого іншого обладнання для обробки. Системи змішування також можна категоризувати відносно до механізмів змішування, що домінують у них. Чотири основні типи: змішувачі-кубики, конвективні, бункерні (гравітаційний потік) і флюїдизовані змішувачі.

Змішувач-кубик є найпростішим і найпоширенішим типом і змішує різні матеріали в повністю закритій ємності або оболонці, що обертається навколо осі, змушуючи частинки всередині змішувача падати одна на одну на поверхні суміші [10]. У випадку горизонтального циліндра обертання можна досягти, розміщуючи циліндр на приводних роликах. В більшості інших випадків ємність кріпиться до приводного валу і підтримується на одному або двох підшипниках.

Загальні форми ємностей включають куб, подвійний конус, барабан, V- та Y-форму, як показано на рис. 1.3. Змішувач-кубик зазвичай використовується для порошків, що вільно течуть, і вважається, що він не дуже добре змішує клейкі порошки [79]. Тим не менш, вони мають переваги завдяки своїй здатності досягати однорідного змішування та легкості в очищенні (мінімальні або відсутні внутрішні частини). Цей тип обладнання найкраще підходить для делікатного змішування порошків з подібними фізичними характеристиками. Сегрегація може бути проблемою, якщо частинки відрізняються, особливо за розміром і формою. Тому потрібне ретельне проектування, щоб мінімізувати ступінь сегрегації. Одним з основних недоліків цього типу змішувачів є можливість деміксування через утворення воронкоподібного потоку при розвантаженні. Дуже мало подвійних конусних або V-конусних змішувачів мають бункерні поверхні з достатнім кутом нахилу та низьким коефіцієнтом тертя для забезпечення масового потоку при розвантаженні.

Конвективні змішувачі в основному здійснюють змішування шляхом транспортування матеріалу по всій ємності змішування за допомогою обертання мішалки. Типовий конвективний змішувач складається зі стаціонарної камери, яку очищують механізми перемішування, такі як обертові лопаті. У конвективних змішувачах змішування є виражено конвективним, і сегрегація значно менше виражена, ніж у змішувачах-кубиках. Більшість конвективних змішувачів мають обертову лопать і переміщують групи частинок з одного місця на інше, тим самим створюючи змішування. Стаціонарна камера змішування може бути конічною, циліндричною або у

формі лотка, а конструкції лопатей варіюються від стрічок до лопатей до гвинтів. Існує чотири загальні типи конвективних змішувачів: змішувач стрічковий, змішувач лопатевий, орбітальний гвинтовий (Nauta) змішувач і вертикальний гвинтовий змішувач, як показано на рис. 2.12. Найбільша привабливість полягає в тому, що багато конвективних змішувачів можна спроектувати для безперервного, а не партійного процесу, що ще більше підвищує їхню корисність.

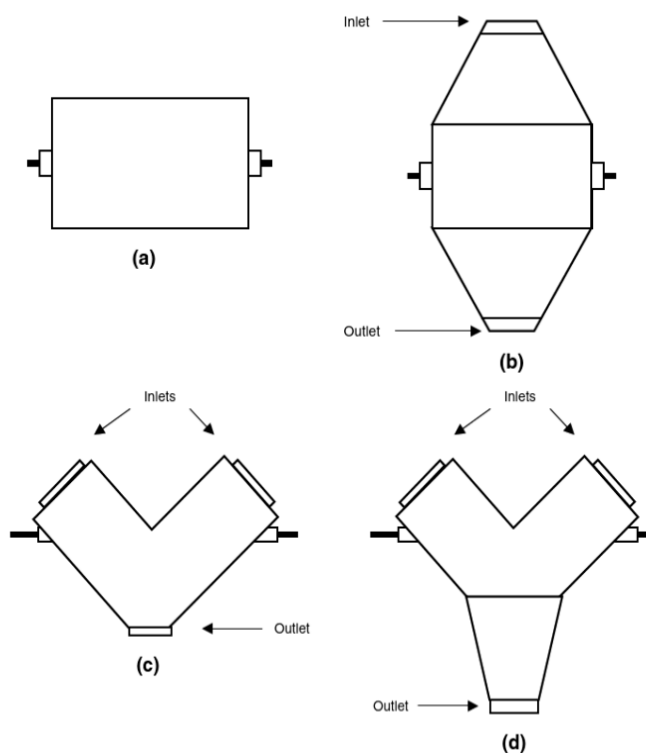


Рисунок 1.3 – Типовий змішувач-кубик. (а) Горизонтальний змішувач; (б) Подвійний конусний змішувач; (с) V-змішувач; (д) Y-змішувач.

Стрічковий змішувач працює на принципі конвективного змішування. Він складається з статичного лотка або циліндра з прикріпленою стрічкою або валом, до якого приєднані два відкритих спіральних гвинти: один правий, а інший лівий, як показано на рис. 1.4 (а). Спіральні стрічки нахилені так, щоб переміщувати матеріал в протилежні напрямки, як осьовий, так і радіальний. Внаслідок цього частинки рухаються в протилежні напрямки і зазнають інтенсивного переміщення відносно одна одної. Стрічковий змішувач є

економічно ефективним для виробництва сухих сумішей для їжі та напоїв. Суміші для тортів і мафінів, покращувачі для хліба, борошно, злаки, снеки, спеції та трави, чайне листя, порошки для холодного чаю, а також цілі або подрібнені кавові зерна - це деякі з сухих сумішей, які виробляються за допомогою стрічкового змішувача. Стрічкові змішувачі також можуть використовуватися для додавання невеликих кількостей рідких ароматизаторів, барвників і олій для покриття або адсорбції на поверхні сухих твердих речовин. Крім того, стрічкові змішувачі можуть також використовуватися для екструзії їжі при підготовці таких продуктів, як паста, готові до споживання злаки, чіпси для перекусів і корм для домашніх тварин. Тут функція стрічкового змішувача полягає в досягненні однорідної суміші двох або більше злаків, борошна, олії, цукру, емульгаторів, допоміжних екструзійних речовин та інших порошків.

Змішувачі з лопатями працюють на подібних швидкостях до стрічкових змішувачів, але безперервна стрічка замінюється під кутом нахиленою і окремою лопаткою. Дизайн, показаний на рис. 2.12(b), працює в двох лотках. Висока мобільність порошку в змішувачі з лопатями призводить до швидкого змішування з типовим часом змішування в одну хвилину, тоді як для стрічкового змішувача - десять хвилин.

У випадку **орбітального гвинтового змішувача** Архімедів гвинт піднімає порошок з основи конічного бункера на поверхню порошку, одночасно просуваючись по стінці бункера. У цьому дизайні центральний конічний об'єм порошку покладається на природну циркуляцію для переміщення порошку в зону змішування. У вертикальному гвинтовому змішувачі зона природної циркуляції більша, а ризик наявності статичних зон збільшується, особливо якщо порошок є клейким. Центральний фіксований гвинт забезпечує більш надійну інженерну конструкцію.

Змішувачі з бункерами. Бункери або силоси можуть бути включені в системи обробки, особливо для змішування або змішування може бути здійснено в бункерах для зберігання. Коли бункер розвантажується, розвивається градієнт швидкості через будь-який горизонтальний переріз, що

призводить до розподілу часу перебування матеріалу та радіального змішування. Осьове змішування досягається шляхом рециркуляції викиду. Однорідну якість продукту можна досягти досить економічно за допомогою цього методу, що є особливо привабливим для великих обсягів матеріалів, таких як зерно, в якому фізичні варіації виникають через час збору врожаю, кліматичні умови та агрономічні техніки. Щоб запобігти коценню більших частинок по поверхні конуса, утвореного центральним накопиченням надходячого матеріалу, можуть бути використані перегородки для рівномірного розподілу надходячого матеріалу по поверхні. Таким чином, зменшується тенденція до сегрегації більших частинок до стінки бункера. Конічний або інший конвеєрний розділ на основі бункера має бути достатньо крутим, щоб забезпечити масовий потік всередині бункера під час розвантаження.

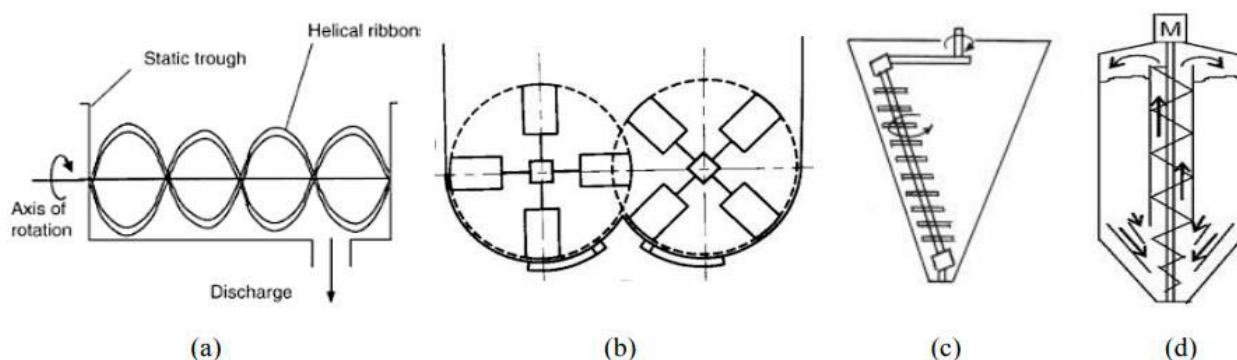


Рисунок 1.4 – Конвективні змішувачі. (а) Стрічковий змішувач; (б) Лопатевий змішувач; (с) Орбітальний гвинтовий (Nauta) змішувач; (д) Вертикальний гвинтовий змішувач

Флюїдизовані змішувачі. Змішування досягається шляхом пропускання газу, зазвичай повітря, через шар частинок на швидкості, достатній для досягнення ефекту бульбашок флюїдизації. Необхідна значна турбулентність, що включає обертання маси, для досягнення достатньої мобільності частинок для змішування і для уникнення сегрегації, що є особливою проблемою для

цього типу змішувача, а також для інших процесів, таких як покриття, сушіння і агломерація, що можуть відбуватися одночасно.

Урахування вибору змішувача. Багато впливаючих факторів потрібно враховувати при виборі, проектуванні та експлуатації змішувального обладнання. При виборі порошкового змішувача потрібно знайти компроміс між якістю суміші та сумісністю різних типів змішувачів з процесом, але початковий вибір повинен виключати змішувачі, які є непідходящими для цієї мети.

Вибір на основі вимог процесу. У деяких промислових процесах змішування розмір частинок потребує модифікації в обладнанні для змішування. Конвективні змішувачі, такі як змішувачі з високошвидкісними лопатями і ножами, мають вузький зазор між мішалкою і змішувачем та можуть забезпечити зменшення розміру частинок. Інші типи змішувачів, такі як змішувачі-кубики і конвективні змішувачі з низькою швидкістю, не можуть зменшити розмір частинок. Тим часом, у багатьох фармацевтичних або харчових промисловостях висока чистота змішуваних продуктів є основною вимогою. Ці процеси змішування потребують високих умов експлуатації та внутрішнього середовища, таких як легкість очищення (необхідно уникати змішування з складними мішалками або мобільними частинами, такими як подвійний конус або Y), якість матеріалу виготовлення та внутрішніх рухомих частин (можуть бути потрібні гладкі, високо поліровані поверхні), проблеми з мастилом (змащені поверхні не повинні контактувати з сумішшю) або зниження якості обладнання при використанні дуже абразивних частинок. Деякі промислові процеси обробляють матеріали, чутливі до тепла, такі як полімеризація, яка викликає екзотермічні реакції через підвищення температури в ємності для змішування. Змішувачі з високим енергетичним внеском, такі як змішувачі з високошвидкісними лопатями, можуть викликати підвищення температури в суміші, і ємність повинна бути оснащена охолоджувальним жакетом. Інша, більш поширена ситуація – це партійні або безперервні процеси змішування. Закриті системи змішування, такі як

змішувачі-кубики, не підходять для безперервних процесів, тоді як конвективні змішувачі з стаціонарними зовнішніми ємностями є переважними для визначення вхідних і вихідних потоків безперервного змішування.

Вибір на основі якості суміші. Якість змішування є найважливішим критерієм оцінки змішувача, а також основним розглядом для промислових процесів змішування при виборі відповідного типу змішувача. У практичних промислових процесах змішування значні відмінності в фізичних властивостях між компонентами суміші, такими як кількість, розміри, густини, форми і зчеплення, призводять до явища сегрегації або деміксування. Ця ситуація широко існує у фармацевтичній та харчовій промисловості, де невеликі кількості і розміри добавок додаються до харчових або лікарських продуктів, і необхідно досягти рівномірного розподілу за допомогою точного управління змішувачем. Як правило, незначний компонент розподіляється повільно, тому досягнення однорідності на дрібному рівні важко забезпечити по всьому змішувачу. Гравітаційні сили ведуть до руху дрібних компонентів вниз, де менші частинки проникають через пори в гранульованому шарі. Такі ситуації потребують гарної відповідності обладнання для змішування до інгредієнтів з різними властивостями. Змішувачі, які спираються на конвективне змішування, менш схильні до сегрегації, ніж ті, які мають переважаючий механізм змішування дифузії або зрізу. Стрічковий змішувач і змішувач Nauta підходять для обробки сумішей з великими відмінностями в фізичних властивостях.

Таблиця 1.1 – Порівняння різних змішувальних обладнань

Тип змішувача	Порційний або безперервний	Основний механізм змішування	Сегрегація	Осьове змішування	Легкість очищення	Тенденція до сегрегації при розвантаженні	Легкість очищення
Горизонтальний барабан	П	Диф.	Погано	Погано	Погано	Погано	Добре
Невеликий нахилений барабан	Б	Диф.	Справ.	Погано	Добре	Добре	Добре
Круто нахилений барабан	П	Диф.	Погано	Добре	Погано	Погано	Добре

Тип змішувача	Порційний або безперервний	Основний механізм змішування	Сегрегація	Осьове змішування	Легкість очищення	Тенденція до сегрегації при розвантаженні	Легкість очищення
Обертвий вертикальний циліндр	П	Зрізний	Погано	Добре	Погано	Добре	Добре
V-образний змішувач	П	Диф.	Погано	Погано	Добре	Добре	Добре
У-образний змішувач	П	Диф.	Погано	Погано	Добре	Добре	Добре
Подвійний конус	П	Диф.	Погано	Погано	Добре	Добре	Добре
Куб	П	Диф.	Погано	Добре	Погано	Добре	Добре
Стрічковий змішувач	П	Конвект.	Добре	Повільно	Добре	Справ.	Справ.
Стрічковий змішувач	Б	Конвект.	Добре	Справ.	Добре	Добре	Справ.
Повітряний змішувач	П	Конвект.	Справ.	Добре	Добре	Добре	Справ.
Nauta змішувач	П	Конвект.	Добре	Добре	Добре	Добре	Погано

Вибір на основі витрат на змішування. Для промислових процесів витрати на експлуатацію повинні бути враховані при виборі процесу змішування. Для загальних промислових процесів витрати на змішування можна розділити на три компоненти: (1) знецінення капітальних витрат, (2) вимоги до енергії, (3) експлуатація та обслуговування. Ці витрати повинні бути включені в витрати на виробництво до того, як змішувач буде офіційно обраний. Крім того, у сучасних промисловостях збільшення ринкових вимог до різних продуктів і зміна практичних вимог призвели до ситуації, коли виробничі процеси тепер повинні бути гнучкими для задоволення змінних вимог клієнтів щодо сировини та операцій. Відповідність змішувача також є важливим параметром для розгляду.

Порівняння різних змішувальних обладнань узагальнене в таблиці 1.1. Вибір типів змішувачів для конкретних промислових процесів залежить від детальних вимог практичного виробництва.

1.5 Висновки з розділу

1. Зростання інтересу до самостійного виготовлення комбікормів на фермах пояснюється економічною доцільністю та доступністю малосерійних установок, при цьому особлива увага приділяється зниженню енерговитрат і

використання матеріалів без втрати якості продукції, що дозволяє підвищити ефективність виробництва комбікормів.

2. Поведінка частинок у системі змішувача є дуже складною, і механізм змішування частинок у всіх типах змішувачів ще далеко не зрозумілий, що є важливим для експлуатації та оптимізації. Розуміння та точний контроль поведінки частинок у процесі змішування частинок є складними завданнями. Тому глибоке розуміння змішування частинок є як науково фундаментальним, так і практично важливим для оптимізації відповідних промислових процесів.

3. Для експериментальних досліджень обертальний барабан є найпоширенішою конфігурацією для вивчення явищ змішування твердих матеріалів у лабораторії. Це пояснюється тим, що геометрія обертального барабана є простою, а умови експлуатації легше контролювати порівняно з іншими типами змішувального обладнання. До того ж, обертальний барабан можна зробити прозорим, закритим і відносно тонким для полегшення спостереження за рухом частинок, що підходить для вивчення деяких фундаментальних явищ змішування твердих матеріалів. Проте непрозора природа інструментів і складний потік всередині змішувача ускладнюють експерименти. Більше того, важко отримати інформацію на рівні частинок, таку як швидкість частинок, сила контакту між частинками та дисперсія частинок. Відсутність такої інформації про процес змішування на рівні частинок обмежує подальше вдосконалення продуктивності змішувачів.

4. Зі швидким розвитком високопродуктивних паралельних обчислювальних технологій, метод дискретних елементів (DEM) стає потужним інструментом для вивчення складних гранульованих систем. Він фіксує траєкторію кожної частинки на мікроскопічному рівні, а також дозволяє відстежувати змінні процесу змішування на макроскопічному рівні. Багато досліджень за допомогою DEM були проведені для вивчення характеристик змішування, головним чином у барабанних і конвективних змішувачах. Відповідна симуляційна робота для інших типів змішувачів дуже обмежена. Проте в практичній промисловості U-подібний стрічковий змішувач

використовується частіше, ніж ідеальний циліндричний, оскільки він зручніший для завантаження матеріалу та очищення. Відповідно, U-подібний стрічковий змішувач демонструє інші, неідеальні умови змішування порівняно з циліндричним. Проте симуляційні дослідження U-подібних змішувачів дуже обмежені, і поведінка частинок при змішуванні все ще недостатньо зрозуміла, що перешкоджає подальшому розвитку та оптимізації ефективності промислового змішування твердих матеріалів.

2 ФІЗИКО-МАТЕМАТИЧНИЙ АПАРАТ ЧИСЕЛЬНОГО МОДЕЛЮВАННЯ

2.1 Керуючі рівняння методу дискретних елементів (DEM)

Рух частинки визначається законом збереження імпульсу як у трансляційному, так і в обертальному русі, що виражається наступним чином:

$$m_i \frac{d\mathbf{v}_i}{dt} = m_i \mathbf{g} + \sum_{j=1}^{k_i} (\mathbf{F}_{c,ij} + \mathbf{F}_{d,ij}) \quad (2.1)$$

$$I_i \frac{d\boldsymbol{\omega}_i}{dt} = \sum_{j=1}^{k_i} (\mathbf{T}_{ij} + \boldsymbol{\Gamma}_{ij}) \quad (2.2)$$

де m_i , I_i , \mathbf{v}_i , $\boldsymbol{\omega}_i$ і \mathbf{g} — це маса, момент інерції, трансляційна та обертальна швидкості, а також прискорення вільного падіння частинки, відповідно; k_i — кількість частинок, що контактують з частинкою i ; \mathbf{F}_c — контактна сила, що складається з нормальної та тангенціальної компонент; \mathbf{F}_d — сили демпфування; \mathbf{T}_{ij} і $\boldsymbol{\Gamma}_{ij}$ — моменти сили та момент кочення на частинку i внаслідок оточуючих частинок, відповідно.

Нижче наведені формули для контактних сил, які використовуються в цьому дослідженні. Код використовує внутрішнє DEM програмне забезпечення. Модель була добре верифікована шляхом порівняння з експериментальними дослідженнями, як зазначено раніше.

Нормальна контактна сила:

$$\mathbf{F}_{c,ij}^n = \left[\frac{2}{3} \frac{E}{(1-\nu^2)} \sqrt{R} \xi_n^{3/2} - C_n \frac{E}{(1-\nu^2)} \sqrt{R} \sqrt{\xi_n} (\mathbf{v}_{ij} \cdot \hat{\mathbf{n}}_{ij}) \right] \hat{\mathbf{n}}_{ij} \quad (2.3)$$

Тангенціальна контактна сила:

$$\mathbf{F}_{c,ij}^s = \mu_s |\mathbf{F}_{c,ij}^n| \left[1 - \left(1 - \min(\xi_s, \xi_{s,max}) / \xi_{s,max} \right)^{3/2} \right] \tilde{\boldsymbol{\xi}}_s \quad (2.4)$$

2.2 Дослідження DEM поведінки взаємодії когезивних частинок

У рамках DEM підходу рух частинки визначається законом збереження імпульсу як у трансляційному, так і в обертальному напрямках, що виражається наступним чином:

$$m_i \frac{d\mathbf{v}_i}{dt} = m_i \mathbf{g} + \sum_{j=1}^{k_i} (\mathbf{F}_{c,ij} + \mathbf{F}_{d,ij} + \mathbf{F}_{lb,ij}) \quad (2.5)$$

$$I_i \frac{d\boldsymbol{\omega}_i}{dt} = \sum_{j=1}^{k_i} (\mathbf{T}_{ij} + \mathbf{M}_{ij}) \quad (2.6)$$

де m_i , I_i і \mathbf{g} — це маса, момент інерції та прискорення вільного падіння частинки i , відповідно. \mathbf{v}_i та $\boldsymbol{\omega}_i$ — це трансляційна і обертальна швидкості. k_i представляє кількість частинок, що контактують з частинкою i . \mathbf{F}_c — контактна сила, що складається з нормальної і тангенціальної компонент. \mathbf{F}_d представляє сили демпфування, які є сумою нормальних і тангенціальних демпфуючих сил у точці контакту з частинкою j . \mathbf{F}_{lb} — це сила рідинного мосту. \mathbf{T}_{ij} і \mathbf{M}_{ij} — це моменти сили та момент тертя кочення на частинку i , викликані оточуючими частинками. Модель DEM була добре верифікована в попередніх публікаціях.

Припускається, що на поверхні частинки існує рідинна плівка, де рідинний міст утворюється при контакті з іншою частинкою. У моделі когезії передбачається, що як відстань утворення, так і відстань розриву визначаються наступним чином:

$$d_0 = \left(1 + \frac{\alpha_{eff}}{2}\right) \cdot V^{\frac{1}{3}} \quad (2.7)$$

де α_{eff} — це ефективний кут змочування, $\alpha_{eff} = 0.5 (\alpha_i + \alpha_j)$, а V представляє об'єм рідинного мосту.

Сила рідинного мосту $\mathbf{F}_{lb,ij}$ може бути розкладена на дві частини: статичну капілярну силу $\mathbf{F}_{sp,ij}$ і динамічну в'язку силу $\mathbf{F}_{dy,ij}$:

$$\mathbf{F}_{lb,ij} = \mathbf{F}_{sp,ij} + \mathbf{F}_{dy,ij} \quad (2.8)$$

Капілярна сила. Різниця тисків через рідинний міст викликає капілярну силу. Формула для обчислення капілярної сили контакту "частинка-частинка", як показано на рис. 5.1(a), наведена нижче:

$$F_{sp,ij} = \frac{2\pi R_{sp,ij} \gamma \cos \theta}{1 + 2d_{sp,ij}} - 2\pi \gamma R_{sp,ij} \sin \alpha \sin(\theta + \alpha) \quad (2.9)$$

де γ представляє поверхневий натяг рідини, θ — кут змочування, α — "кут обхвату" — найкоротша відстань між двома сферами. Ефективний радіус частинки $R_{sp,ij}$ обчислюється так:

$$R_{sp,ij} = \frac{R_i R_j}{R_i + R_j} \quad (2.10)$$

де R_i і R_j представляють радіуси частинок i і j , відповідно. Формула для $d_{sp,ij}$, що описує взаємодію двох сфер, наведена нижче:

$$d_{sp,ij} = \frac{S}{2} \left(-1 + \sqrt{1 + \frac{2V}{\pi R_{sp,ij} S^2}} \right) \quad (2.11)$$

Той самий підхід застосовується до взаємодії "частинка-стінка", за винятком того, що об'єм рідинного мосту вважається таким, що надходить тільки від частинки, і рідина повертається на частинку після зіткнень. На рис. 2.1(b) показано схему моделі рідинного мосту для контакту "частинка-стінка".

В'язка сила. Крім статичної капілярної сили, викликані наявністю рідинної плівки, динамічне витіснення і розтягнення рідини між частинками призводить до в'язкого опору руху частинок. В'язка сила була розроблена за допомогою теорії мастила і запропонована Насе та ін. В'язка сила складається з нормальної і тангенціальної компонент (див. рис. 2.2) і пропорційна в'язкості рідини та відносній швидкості між двома контактуючими частинками, і обернено пропорційна відстані між ними. При збільшенні відстані в'язка сила зменшується. Нормальна і тангенціальна частини в'язкої сили можуть бути обчислені так:

$$F_{dv,ij}^n = 6\pi \mu R_{sp,ij} v_n \cdot R_{sp,ij} S \quad (2.12)$$

де μ — в'язкість рідини. v_n означає відносну нормальну швидкість частинок. У тангенціальному напрямку Лян та ін. запропонували використовувати рішення,

запропоноване Голдманом та ін., для розрахунку в'язкої сили між вологою частинкою і плоскою поверхнею:

$$F_{dv,ij}^t = 6\pi\mu R_{sp,ij} \cdot v_t \cdot \left(\frac{8}{15} \cdot \ln \left(\frac{R_{sp,ij}}{S} \right) \right) + 0.9588 \quad (2.13)$$

де v_t представляє відносну тангенціальну швидкість частинок.

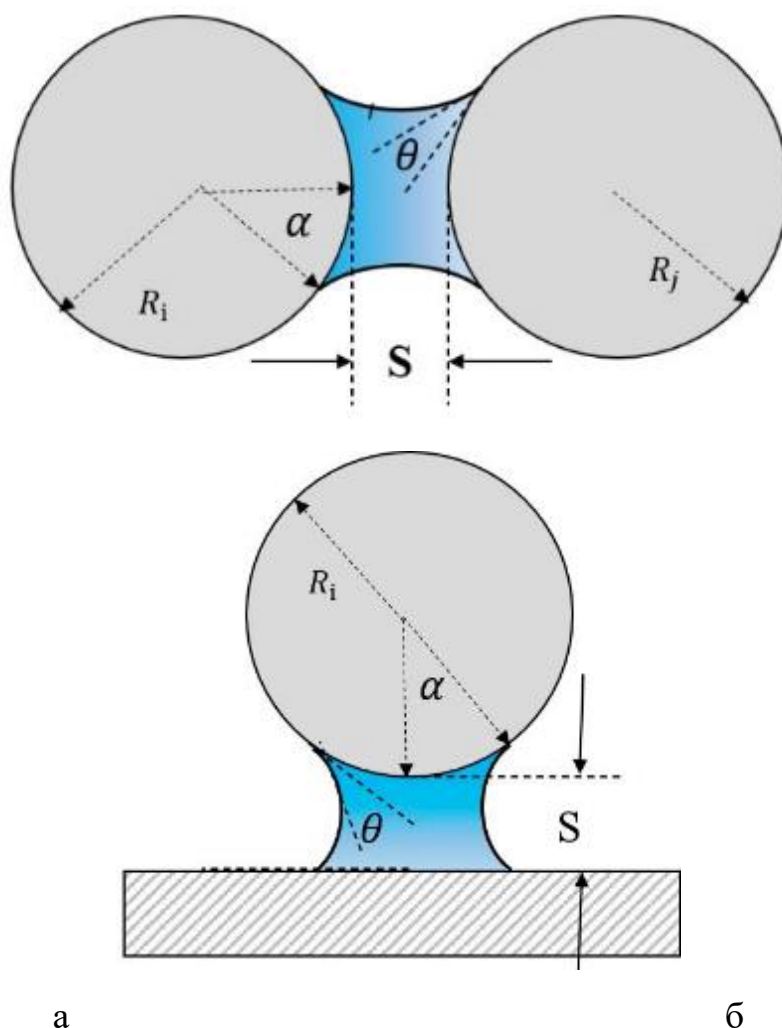


Рисунок 2.1 – Схематичне зображення капілярної сили моделі рідинного містка: контакт частинка-частинка (а); контакт частинки зі стінкою (б)

У цій моделі деформація рідинного мосту не враховується. Передбачається, що рідинний міст симетричний відносно лінії між центрами двох контактуючих частинок. Крім того, в даній симуляції зроблено кілька припущень для спрощення моделі: (1) об'єм рідини рівномірно розподіляється між двома контактуючими частинками; (2) тільки частина об'єму рідини сприяє

утворенню рідинного мосту; (3) для розрахунку сили рідинного мосту прийнята мінімальна відстань розділення S_{\min} .

На рис. 2.2 показана схема в'язкої сили в моделі рідинного мосту.

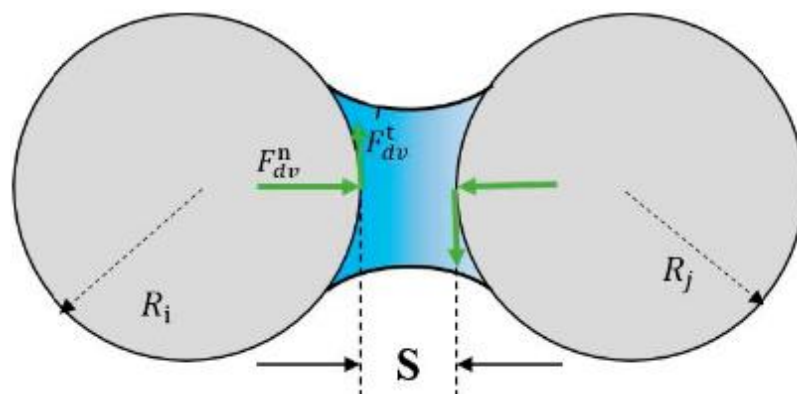


Рисунок 2.2 – Схематичне зображення сили в'язкості моделі рідинного містка

2.3 Дослідження DEM поведінки взаємодії несферичних частинок

Рівняння супер-квадрики є загальним методом математичного опису несферичних частинок і може використовуватися для представлення частинок з різною блокуватістю поверхні та співвідношенням сторін. Цю форму вперше представив у математиці Барр, використали в DEM Вільямс і Пентланд у 2D DEM, а також Клері у 3D DEM моделюванні.

Рівняння супер-квадрики виглядає так:

$$\left(\left(\frac{x}{a} \right)^{n_2} + \left(\frac{y}{b} \right)^{n_2} \right)^{\frac{n_1}{n_2}} + \left(\frac{z}{c} \right)^{n_1} - 1 = 0 \quad (2.14)$$

де a , b , c — це напівдовжини осей супер-квадричних елементів, а n_1 та n_2 визначають форму частинки і блокуватість поверхні. Параметри $n_1 = n_2 = 2$ дають еліпсоїд, а циліндр отримуємо, якщо $n_1 = 2$ і $n_2 > 2$, та частинка у формі коробки — якщо $n_1 > 2$ і $n_2 > 2$. Супер-квадрики є чудовим компромісом між складністю моделі та гнучкістю форми, просто змінюючи 5 параметрів форми (a , b , c , n_1 , n_2) у формулі (2.14).

Моделювання виконується в рамках DEM, яка використовує закон Ньютона для відстеження траєкторії кожної частинки та контактну модель

м'якої сфери для вирішення зіткнень між частинками. Трансляційні та обертальні рухи частинки описуються такими рівняннями:

$$m_i \frac{dv_i}{dt} = m_i \mathbf{g} + \sum_{j=1}^{k_i} (\mathbf{F}_{c,ij} + \mathbf{F}_{d,ij}) \quad (2.15)$$

$$I_i \frac{d\omega_i}{dt} = \sum_{j=1}^{k_i} (\mathbf{T}_{ij} + \mathbf{M}_{ij}) \quad (2.16)$$

де m_i , I_i , v_i , ω_i та \mathbf{g} — це маса, момент інерції, трансляційна та обертальна швидкості, а також прискорення вільного падіння частинки відповідно. k_i — кількість частинок, що контактують з частинкою i . \mathbf{F}_c представляє контактну силу, що складається з нормальної та тангенціальної компонент. \mathbf{F}_d представляє сили демпфування, які є сумою нормальних і тангенціальних демпфуючих сил у точці контакту з частинкою j . \mathbf{T}_{ij} та \mathbf{M}_{ij} — це моменти від тангенціального зіткнення і кочення.

Для моделювання супер-квадричних частинок у DEM контактна сила та точка контакту між двома несферичними частинками залежать від їх орієнтації, тому точне визначення та інтеграція орієнтації стають критично важливими. Тому для зручного моделювання обертання частинок застосовуються локальні координати. Загалом, для опису перетворення між локальною системою координат, закріпленою на тілі, та глобальною системою координат основними методами визначення обертального руху частинок є три кути Ейлера та кватерніони. У порівнянні з кутами Ейлера, кватерніони уникають появи сингулярностей. Матриця обертання A може бути визначена за допомогою кватерніона $Q(q_0, q_1, q_2, q_3)$:

$$A = \begin{bmatrix} q_0^2 + q_1^2 - q_2^2 - q_3^2 & 2(q_1q_2 + q_0q_3) & 2(q_1q_3 - q_0q_2) \\ 2(q_1q_2 - q_0q_3) & q_0^2 - q_1^2 + q_2^2 - q_3^2 & 2(q_2q_3 + q_0q_1) \\ 2(q_1q_3 + q_0q_2) & 2(q_2q_3 - q_0q_1) & q_0^2 - q_1^2 - q_2^2 + q_3^2 \end{bmatrix} \quad (2.17)$$

Кватерніони пов'язані з кутами Ейлера такими співвідношеннями:

$$q_0 = \cos \frac{\varnothing}{2} \cos \frac{\varphi + \psi}{2}, \quad q_1 = \sin \frac{\varnothing}{2} \cos \frac{\varphi - \psi}{2} \quad (2.18)$$

$$q_2 = \sin \frac{\varnothing}{2} \sin \frac{\varphi - \psi}{2}, \quad q_3 = \cos \frac{\varnothing}{2} \cos \frac{\varphi + \psi}{2} \quad (2.19)$$

де θ , φ , та ψ — це кути Ейлера. Орієнтація супер-квадричної частинки визначає зв'язок між системою просторових координат e^s та системою, закріпленою на тілі e^b . Ці компоненти пов'язані за допомогою матриці обертання A :

$$e^b = A \cdot e^s \quad (2.20)$$

$$e^s = A^T \cdot e^b \quad (2.21)$$

Тут матриця обертання має властивість $A^{-1} = A^T$. Для детальнішого опису розрахунку кватерніонів зверніться до роботи Фрітцера.

Виявлення контакту між двома супер-квадриками може бути встановлено шляхом перетину поверхонь, визначених їх неявними функціями. У порівнянні з простим та ефективним виявленням контакту між сферичними частинками, співвідношення часу виявлення контакту між неправильними частинками до загального часу симуляції значно збільшується, і обчислювальна ефективність головним чином залежить від форми частинок, граничних умов та алгоритму пошуку. Для виконання симуляцій у великомасштабних системах необхідно оптимізувати обчислювальну стратегію. Кількість потенційних контактних пар у списку сусідів може бути зменшена за допомогою обмежувальних об'ємів. Обмежувальний об'єм — це простий об'єм, який інкапсулює більш складне тіло. Такі обмежувальні об'єми включають обмежувальні сфери та орієнтовані обмежувальні коробки (ООК). Обмежувальна сфера є найбільш пам'яттєво ефективним обмежувальним об'ємом. Перевірка перетину сфер полягає в оцінці, чи є відстань між центрами сфер меншою або рівною сумі їх радіусів. Якщо відстань між центрами двох частинок менша або дорівнює сумі їх відповідних радіусів, вони знаходяться в контакті. Хоча обмежувальна сфера є орієнтаційно інваріантним наближенням частинки, орієнтована обмежувальна коробка (ООК) може враховувати орієнтацію та співвідношення сторін частинки. Якщо відстань між двома центрами частинок, проєктована на вісь розділення, більша за суму проєкцій кожної коробки на неї, коробки не перетинаються між собою.

Метод Ньютона-Рафсона використовується для розрахунку перекриття між супер-квадричними частинками А і В, як показано на рис. 2.3, який полягає у знаходженні "проміжної" точки X_0 . Нелінійні рівняння розраховуються наступним чином:

$$\begin{cases} \nabla F_i(X) + \lambda^2 \nabla F_j(X) = 0 \\ F_i(X) - \nabla F_j(X) = 0 \end{cases} \quad (2.22)$$

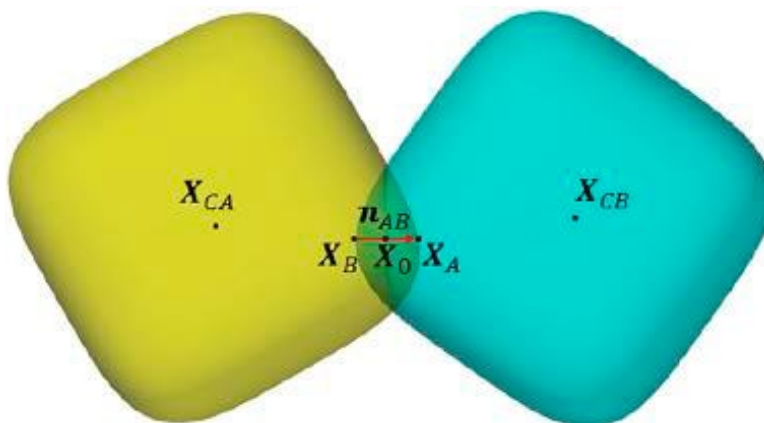


Рисунок 2.3 – Виявлення контакту між суперквадричними частинками

Нормальна сила в основному включає в себе пружну силу та в'язку силу:

$$F_n = K_n \delta_n^{3/2} + C_n A v_{n,ij} \quad (2.23)$$

де C_n і $v_{n,ij}$ — це, відповідно, коефіцієнт нормального демпфування та нормальна відносна швидкість, а K_n і A — це, відповідно, нормальна еквівалентна жорсткість і в'язкий параметр, які визначаються за формулами:

$$K_n = 4/3 E^* (R^*)^{1/2} \quad (2.24)$$

$$A = (8 m^* E^* (R^* \delta_n)^{1/2})^{1/2} \quad (2.25)$$

$$E^* = \frac{E}{2(1-\nu^2)}, \quad m^* = \frac{m_i \cdot m_j}{m_i + m_j}, \quad R^* = \frac{R_i R_j}{R_i + R_j} \quad (2.26)$$

де E та ν — це відповідно модуль Юнга та коефіцієнт Пуассона. R — це еквівалентний радіус кривизни в точці контакту з максимальною величиною, яка дорівнює десяти радіусам сфери еквівалентного об'єму. R_i та R_j — це радіуси частинок i та j . Тут радіус частинки визначається як $R = 1/K_{mean}$. K_{mean}

— це середній коефіцієнт локальної кривизни, розрахований у точках X_i та X_j для кожної частинки відповідно:

$$K_{mean} = (\nabla F^T \cdot H(F) \cdot \nabla F - |\nabla F|^2 (F_{XX} + F_{YY} + F_{ZZ})) / 2|\nabla F|^3 \quad (2.27)$$

Тангенціальна контактна сила також включає пружну силу (F_{te}) та в'язку силу (F_{td}), які враховують закон Мора-Кулона. Тут F_{te} визначається за формулою:

$$F_t^e = \mu_s \left| K_n \delta_n^{\frac{3}{2}} \right| \left(1 - \left(1 - \frac{\min(\delta_t, \delta_{t,max})}{\delta_{t,max}} \right)^{3/2} \right) \quad (2.28)$$

де μ_s — це коефіцієнт тертя ковзання, а δ_t — це загальне тангенціальне зміщення, яке додається до відносного тангенціального зміщення на кожному кроці DEM, що визначається як $\delta t = \delta_t + v_{t,ij} \cdot dt$. $v_{t,ij}$ — це відносна тангенціальна швидкість, а $\delta_{t,max} = \mu_s(2 - \nu) / (2(1 - \nu) \cdot \delta_n)$.

Тангенціальна в'язка сила F_{td} визначається за формулою:

$$F_t^d = C_t \left(6\mu_s m^* \left| K_n \delta_n^{\frac{3}{2}} \right| \left(1 - \frac{\min(\delta_t, \delta_{t,max})}{\delta_{t,max}} \right)^{1/2} / \delta_{t,max} \right)^{1/2} \cdot v_{t,ij} \quad (2.29)$$

де C_t — це коефіцієнт тангенціального демпфування.

Коли частинки обертаються відносно одна одної, момент ($M_{r,ij}$), що виникає внаслідок тертя при коченні, може бути виражений як:

$$M_r = \mu_r R_i |F_n| \hat{\omega}_{ij}^n \quad (2.30)$$

де μ_r — це коефіцієнт тертя при коченні, а $\hat{\omega}_{ij}^n$ — нормальна відносна швидкість обертання.

2.4 Висновки з розділу

1. Рух частинок у методі дискретних елементів (DEM) визначається законом збереження імпульсу для трансляційного та обертального рухів, з урахуванням контактних сил, демпфуючих сил, а також моментів сил і моментів кочення між частинками. Модель була верифікована експериментальними дослідженнями для забезпечення точності результатів.

2. У дослідженні поведінки когезивних частинок в рамках методу дискретних елементів (DEM) розглядається взаємодія частинок через контактні сили, рідинний міст та сили демпфування. Модель когезії враховує капілярну і в'язку сили, які виникають через рідинний міст між частинками. В'язка сила залежить від відносної швидкості частинок та в'язкості рідини, зменшуючись зі збільшенням відстані між частинками.

3. Дослідження поведінки несферичних частинок за допомогою DEM показує, що для точного моделювання їх взаємодій важливо враховувати геометричну форму частинок, яка описується рівняннями супер-квадрики. Такий підхід дозволяє гнучко змінювати форму частинок і моделювати складні процеси взаємодії. Однак через складність несферичних форм значно зростає час виявлення контактів між частинками, що потребує оптимізації обчислювальних стратегій для масштабних симуляцій.

3 МЕТОДИКА ЧИСЕЛЬНОГО МОДЕЛЮВАННЯ СТРІЧКОВОГО ЗМІШУВАЧА КОРМІВ

3.1 Постановка задачі

Рис. 3.1 показує геометрію стрічкового змішувача та початкову упаковку частинок, використану в цьому дослідженні. Основні розміри змішувача вибрані з використанням комерційного стрічкового змішувача, виготовленого компанією Eirich Machines (США). Для спрощення змішувач вважається циліндричним, а чотири лопатки, кожна з радіусом 10 мм, використовуються тут, як і в попередньому дослідженні. Змішувач має лише два спіральних леза, кожне з яких починається з одного з кінців посудини, але спірально обертається в протилежних напрямках. Валовий змішувач розташований горизонтально вздовж осі циліндричної посудини.

Розміри змішувача і змішувальної посудини та інші параметри частинок для симуляцій DEM показані в таблиці 3.1.

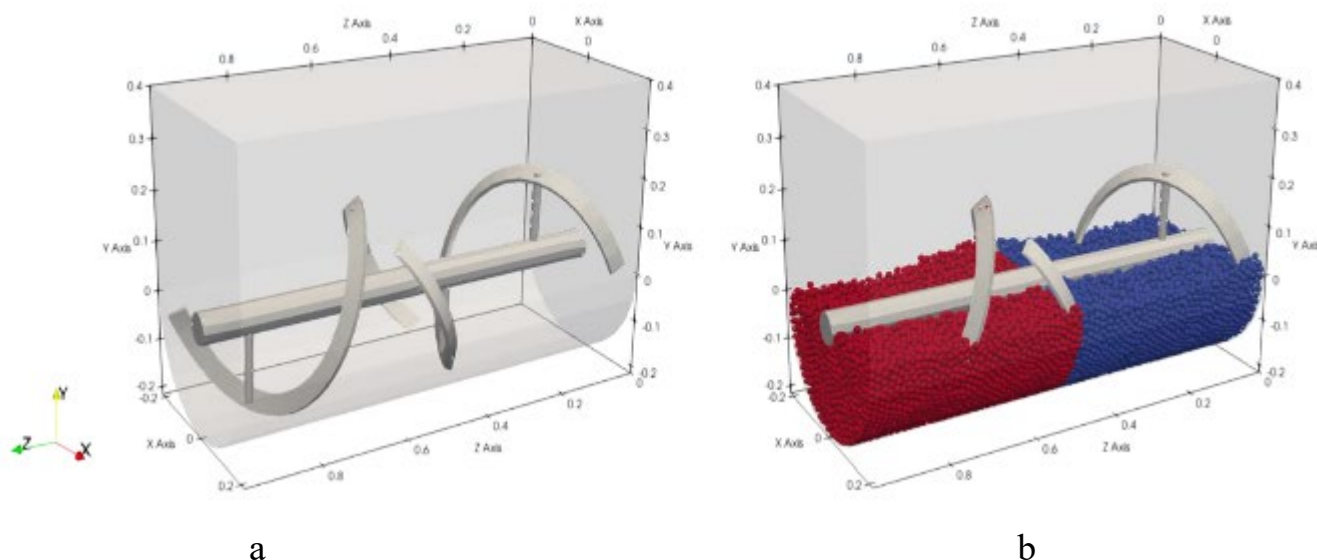


Рисунок 3.1 – Стрічковий змішувач, використаний у поточному дослідженні: (a) конфігурація геометрії; (b) початкова упаковка частинок, позначена двома кольорами

У цьому дослідженні використовується внутрішній код DEM, який був систематично перевірений і застосований для оцінки різних процесів змішування. Технічно частинки випадковим чином генеруються в системі, а потім вільно падають, врешті-решт формуючи упаковане середовище з кінетичною енергією частинок, що розсіюється до нуля. Положення та швидкість кожної частинки на кожному новому кроці часу оновлюються шляхом явного інтегрування основних рівнянь трансляційних і обертових рухів частинок.

У симуляції використовуються частинки з діаметром 15 мм, а рівень заповнення утримується на рівні 40%, при цьому число частинок становить 23 870. Швидкість змішувача встановлена на 100 об/хв. Крок часу дорівнює 1×10^{-5} с, при цьому кожен випадок розраховується за загальний фізичний час 120 с.

Таблиця 3.1 – Параметри симуляції, використані в цьому дослідженні

Параметр	Значення	Од. вим.
Діаметр посудини, D_V	432	мм
Довжина посудини, L_V	970	мм
Крок лопатки, L_B	484	мм
Кут нахилу лопатки, θ	45, 135	град.
Протяг лопатки, Δ	8.5	мм
Діаметр вала, D_S	31.75	мм
Діаметр частинки, d	15	мм
Щільність частинки, ρ_p	2500	кг/м ³
Модуль Юнга, E_p	1×10^8	Н/м ²
Коефіцієнт Пуассона, ν_p	0.29	-
Коефіцієнти демпфування, c_n і c_t	0.3	-
Коефіцієнт ковзання, μ_s	0.3	-
Коефіцієнт кочення, μ_t	0.002	-

3.2 Статистичне проєктування та аналіз віртуального експерименту DEM

Використовуючи попередні дослідження ключових впливів (наприклад, рівень заповнення, швидкість змішувача, щільність частинок і розмір частинок) на поведінку змішування, можна виявити, що зміна кожного параметра має монотонний вплив на кінцевий ступінь змішування. Для отримання всебічного аналізу зв'язку між експлуатаційними параметрами та кінцевим ступенем змішування у цій роботі використовується метод RSM. Оптимізація за допомогою методу RSM включає три основні етапи: (1) статистичне проєктування експериментів; (2) оцінка коефіцієнтів у математичній моделі; (3) прогнозування результатів і перевірка адекватності моделі. Для визначення оптимальних умов у цій роботі розглядаються чотири незалежні змінні: рівень заповнення, швидкість змішувача, щільність частинок і розмір частинок. Досліджуються їх впливи на кінцевий ступінь змішування.

Метод центрального композиційного проєктування (CCD) застосовується як інструмент експериментального проєктування RSM для дослідження впливу незалежних змінних на кінцевий середній ступінь змішування. Рівні розглянутих незалежних змінних та їх діапазони для кінцевого середнього ступеня змішування в стабільному стані представлені в таблиці 3.2. CCD включає 30 віртуальних експериментальних випробувань, з яких шість випробувань розглядаються як повторення центральних точок. Ці 30 випробувань використовують CCD, а відповідні результати (кінцевий середній ступінь змішування $\bar{M}(-)$) для кожного випробування. В загальному випадку, результат використовується для побудови емпіричної моделі, яка корелює з експериментальними змінними за допомогою рівняння другого ступеня:

$$\bar{M} = \beta_0 + \sum_{i=1}^n \beta_i X_i + \sum_{i=1}^n \beta_{ii} X_i^2 + \sum_{i=1}^n \sum_{j=i+1}^n \beta_{ij} X_i X_j \quad (3.1)$$

де \bar{M} представляє прогнозований результат; β_0 є перехопленням; β_i є лінійними коефіцієнтами; β_{ii} є квадратичними коефіцієнтами; β_{ij} є коефіцієнтами взаємодії; X_i та X_j є різними незалежними змінними.

Таблиця 3.2 – Рівні змінних процесу змішування, що розглядаються

Фактор	Змінна	Од. вим.	Мінімум	Максимум	Кодовий низький	Кодовий високий
A	Рівень заповнення	-	0.1	0.5	-1↔0.20	+1↔0.40
B	Швидкість змішувача	об/хв	75	175	-1↔100	+1↔150
C	Щільність частинок	кг/м ³	250	3250	-1↔1000	+1↔2500
D	Розмір частинок	мм	10	30	-1↔15	+1↔25

Аналіз дисперсії (ANOVA) є важливим для визначення адекватності та значущості квадратичної моделі. Визначається значення критерію Фішера F, що свідчить про значущість моделі. Існує лише 0.01% ймовірність того, що значення F може виникнути через шум. Значення p менше 0.05 вказують на те, що терміни моделі є значущими. У цьому випадку визначається значущість факторів і їх взаємодій A, B, C, D, AB, AC, AD, BC, BD, CD, A², B², C², D² в моделі. Інші терміни моделі можна вважати незначними через їх значення p більше 0.05. Ці незначні терміни моделі можна видалити, і тест на відсутність відповідності також показує, що він є незначним.

3.3 Висновки з розділу

1. Наведено методикау чисельного моделювання стрічкового змішувача кормів з використанням методу дискретних елементів (DEM). Моделювання включало вивчення геометрії змішувача та початкову упаковку частинок, що дозволило розглянути вплив різних параметрів, таких як рівень заповнення,

швидкість змішувача, щільність та розмір частинок, на кінцевий ступінь змішування.

2. Метод центрального композиційного проектування (CCD) був застосований для статистичного проектування та аналізу експериментів, що дозволило визначити оптимальні умови змішування. Аналіз дисперсії (ANOVA) підтвердив адекватність квадратичної моделі, вказуючи на значущість основних термінів та їх взаємодій. Значення p менше 0.05 підтвердили значущість факторів A, B, C, D та їх взаємодій, в той час як інші терміни були визнані незначними і можуть бути виключені з моделі. Результати підтверджують ефективність використаних методів для покращення розуміння та оптимізації процесів змішування у стрічкових змішувачах.

4 РЕЗУЛЬТАТИ ЧИСЕЛЬНОГО МОДЕЛЮВАННЯ СТРІЧКОВОГО ЗМІШУВАЧА КОРМІВ

4.1 Вплив рівня заповнення на поведінку змішування

Число координації, або кількість точок контакту на частинку, є важливим мікроскопічним параметром для опису практичного процесу змішування частинок, який широко використовувався в попередніх дослідженнях. Якщо відстань між поверхнями двох частинок менше $0.1d$, то ці частинки можна вважати такими, що контактують одна з одною. Число координації визначається як кількість частинок, які контактують з цільовою частинкою. Для вимірювання щільності частинкового середовища під час процесу змішування використовується миттєве середнє число координації (CN), яке змінюється з часом і розраховується за формулою:

$$CN = \frac{2N_c}{N_p} \quad (4.1)$$

де N_c — загальна кількість контактів, а N_p — загальна кількість частинок.

На рис. 4.1 (а) частинки спочатку розміщені у боковому розташуванні. Різні частинки контактують тільки на проміжному сусідньому рівні, що є незначним у порівнянні з кількістю частинок у системі. Тому середні значення CN починають з нуля для всіх систем змішування. Як тільки відбувається взаємопроникнення різних частинок, зіткнення між частинками швидко зростають протягом 0~40 с, що свідчить про те, що мікромасштабний процес змішування відбувається. Після 80 с середні значення CN досягають сталих значень, що означає, що стан змішування досягає динамічної рівноваги. Середні значення CN для рівнів заповнення 20%, 30%, 40% і 50% у стадії динамічної рівноваги становлять 2.40, 2.65, 2.83 і 2.97 відповідно, що вказує на те, що збільшення рівня заповнення збільшує загальне CN різних частинок.

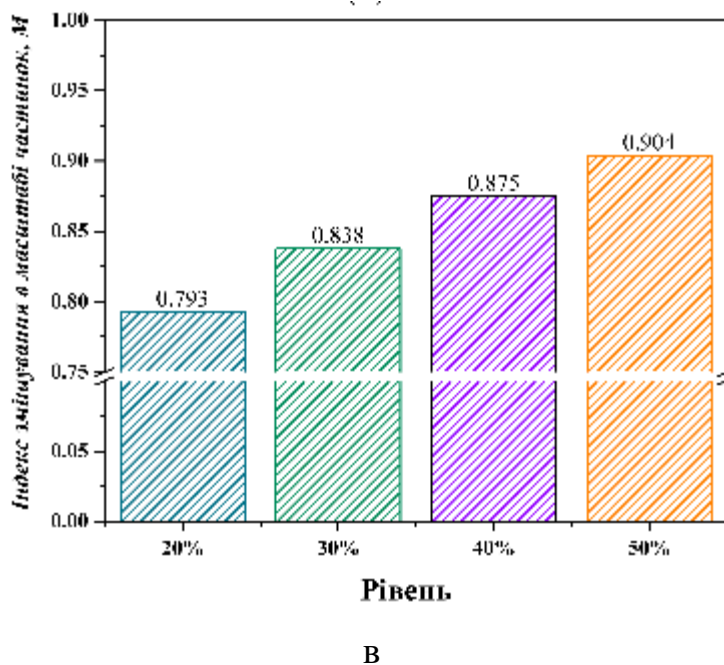
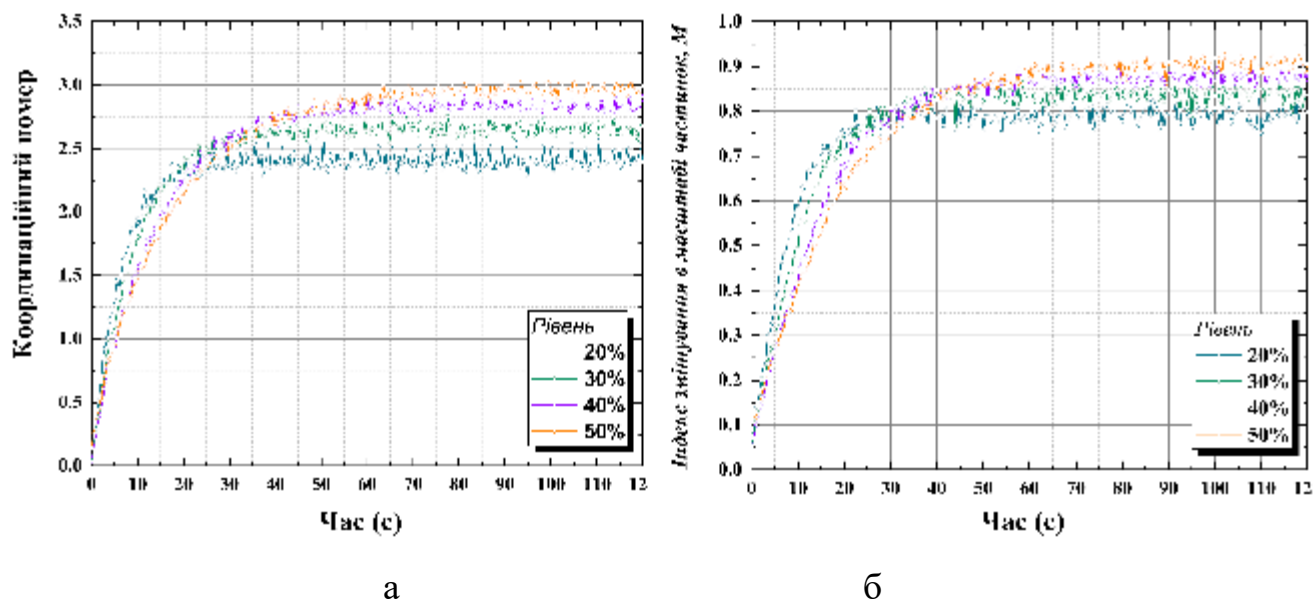


Рисунок 4.1 – Середнє CN між двома типами частинок протягом часу (а); профілі зміни в часі індексів змішування Лейсі стрічкових змішувачів з різними рівнями заповнення (б); усереднені за часом індекси змішування змішувачів з різними рівнями заповнення (в)

На рис. 4.1 (б) кількісно порівнюються часові зміни індексів змішування Лейсі для чотирьох різних рівнів заповнення. Відзначено, що еволюція індексу змішування Лейсі показує узгоджену зміну регулярності, що відображає практичні характеристики фізичного процесу змішування. Всі індекси змішування швидко зростають на початку і потім коливаються навколо сталих

значень, де коливання викликані періодичним обертанням лопаток. Рівень заповнення суттєво впливає на стан змішування під час процесу змішування. Як показано на рис. 4.1 (б), швидкість змішування зменшується із збільшенням рівня заповнення, при цьому рівень заповнення 20% досягає сталого стану найшвидше, а рівень заповнення 50% — найповільніше.

Середні індекси змішування з 80 с до 120 с показують, що кінцевий ступінь змішування зростає зі збільшенням рівня заповнення, при цьому середні значення становлять 0.793, 0.838, 0.875 і 0.904 для 20%, 30%, 40% і 50% відповідно.

Для аналізу моделей потоку частинок у змішувачі на рис. 4.2 (а) показані поздовжні і радіальні вектори швидкості частинок для змішувача з різними рівнями заповнення на 100 с. Рух лопаток ініціює змішування, переміщаючи зібрані частинки з одного регіону в інший у межах змішувальної посудини. Цей рух також створює площини ковзання, що часто призводить до змішування зсувом. Дифузійне змішування зазвичай має мінімальне значення в цьому типі змішувача. Тому змішування порошків у стрічковому змішувачі здійснюється в основному за рахунок конвекції і зсуву. Тим часом частинки переважно рухаються в обертальному напрямку, і обертальний потік частинок зростає зі збільшенням рівня заповнення. Одночасно спостерігається обмежений осьовий рух частинок. Частинки поблизу лопаток досягають відносно високих швидкостей, але більшість частинок, розташованих між двома сусідніми лопатками, є нерухомими.

Для кількісного порівняння компоненти швидкості в трьох напрямках всіх частинок підраховуються в трьох змішувачах. Розподіли ймовірностей компонентів швидкості на 100 с показані на рис. 4.2 (б, в, г). Розподіл ймовірностей має тенденцію до нормального розподілу навколо нульової швидкості, що означає, що велика частка частинок, розташованих між двома сусідніми лопатками, є нерухомими. В радіальному напрямку (X- і Y-координатні напрямки) частка частинок, що підлягають впливу обертання лопаток, зростає зі збільшенням рівня заповнення. Тому, як видно на рис. 4.2 (б, в), зростає ймовірність нерухомих

частинок ($v = 0$ м/с) в радіальному напрямку зі збільшенням рівня заповнення. Крім того, високий рівень заповнення заважає осьовому руху частинок (Z -координатний напрям). Тому з ростом рівня заповнення більша частка частинок має низькі швидкості, як показано на рис. 4.2 (г).

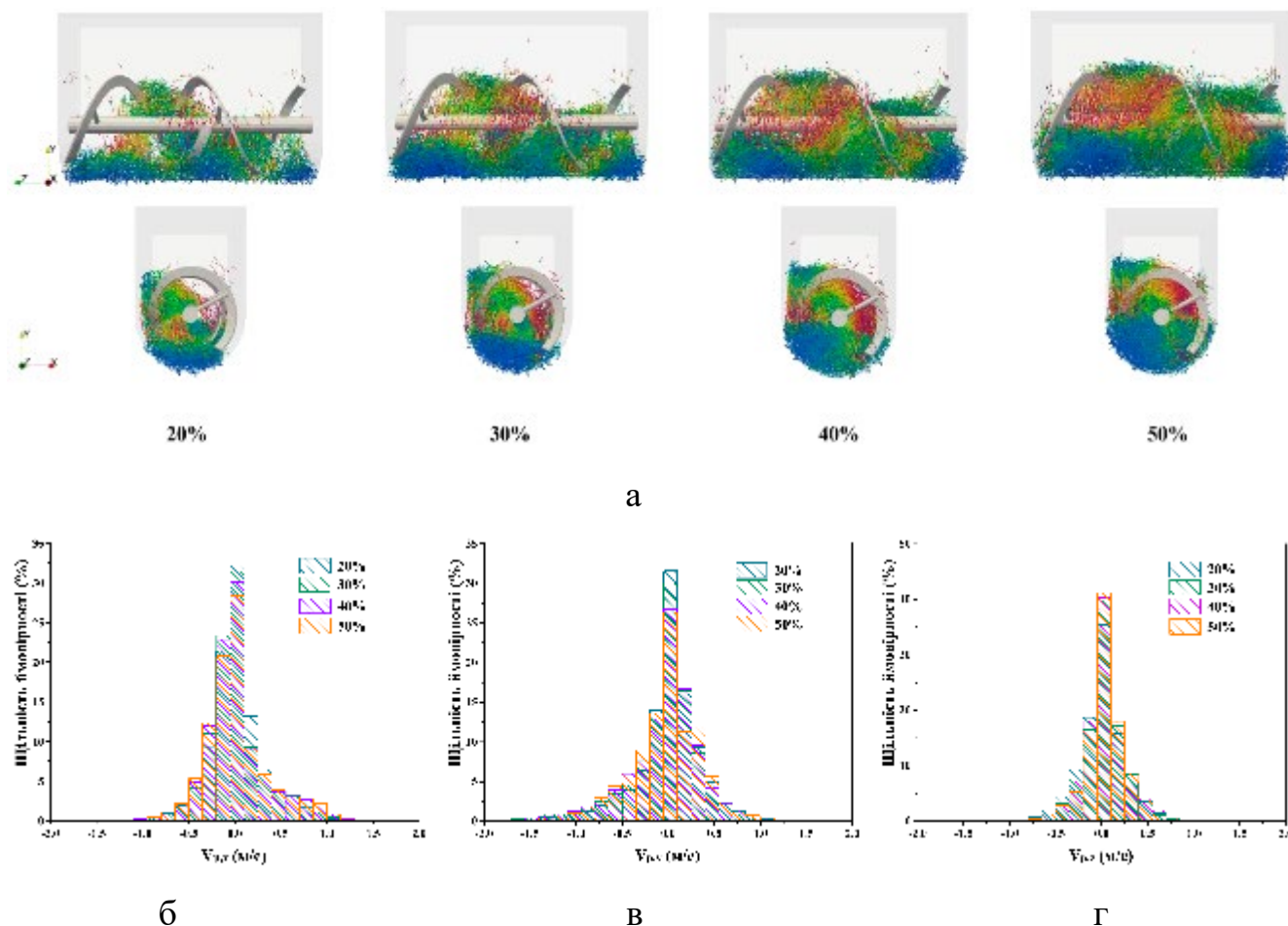


Рисунок 4.2 – Розподіл швидкостей частинок у змішувачі з різними рівнями заповнення (а) та розподіл щільності ймовірності компонентів за координатою X (б), координати Y (в) та координати Z (г) швидкостей у змішувачі з різними рівні заповнення при $t = 100$ с

Змішувальна швидкість частинок у стрічковому змішувачі суттєво впливає на глобальну поведінку змішування, і змішувальна швидкість частинок у бінарній системі частинок може бути отримана шляхом оцінки її дисперсійної поведінки. Коефіцієнт дисперсії використовується для подальшого дослідження механізму змішування стрічкового змішувача на мікроскопічному рівні.

Інтенсивність дисперсії твердої фази кількісно описується за допомогою коефіцієнта дисперсії твердої фази.

На рис. 4.3 (а, б, в) показані часові еволюційні профілі коефіцієнтів дисперсії твердої фази в X-, Y- і Z-координатних напрямках відповідно.

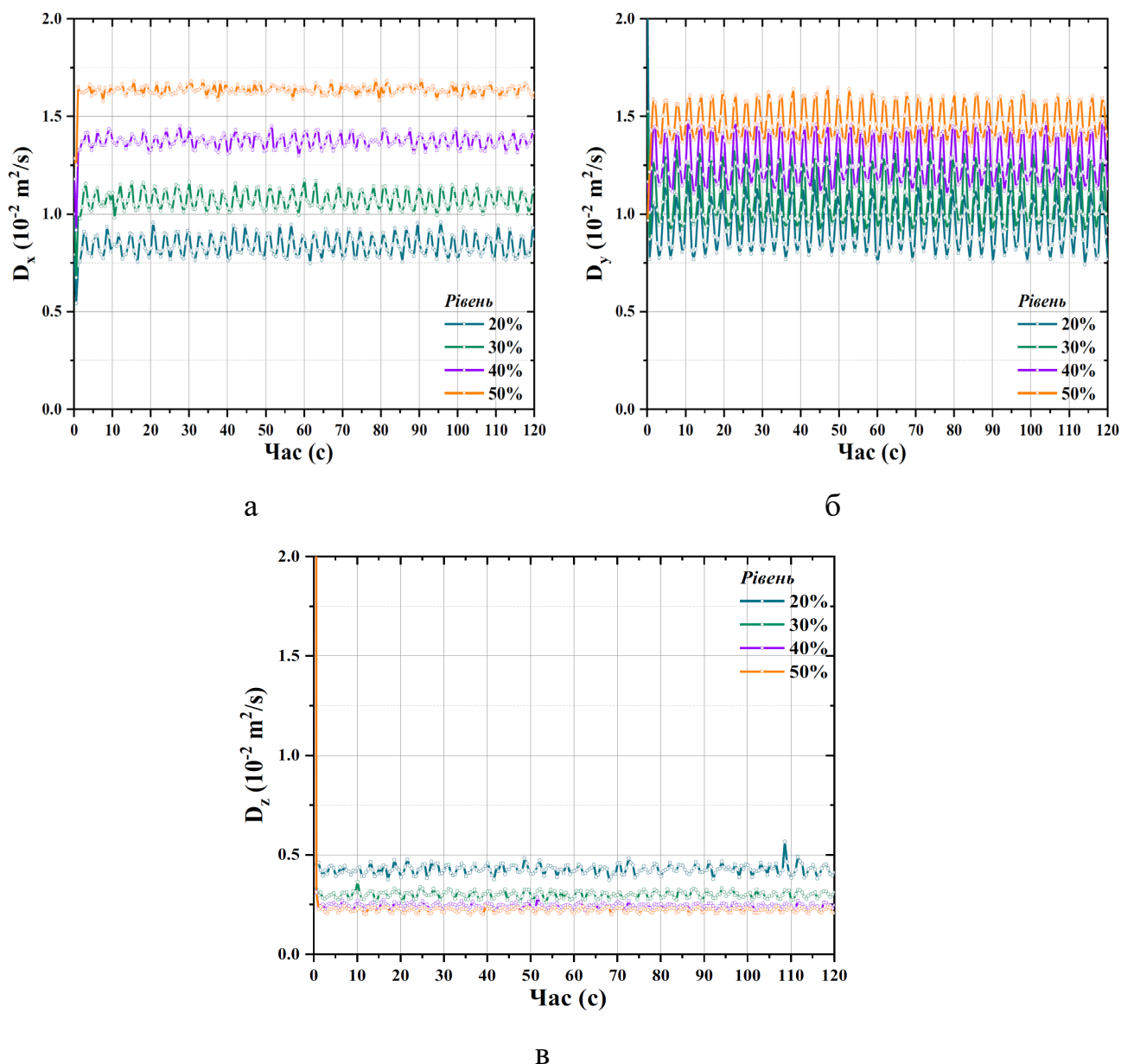


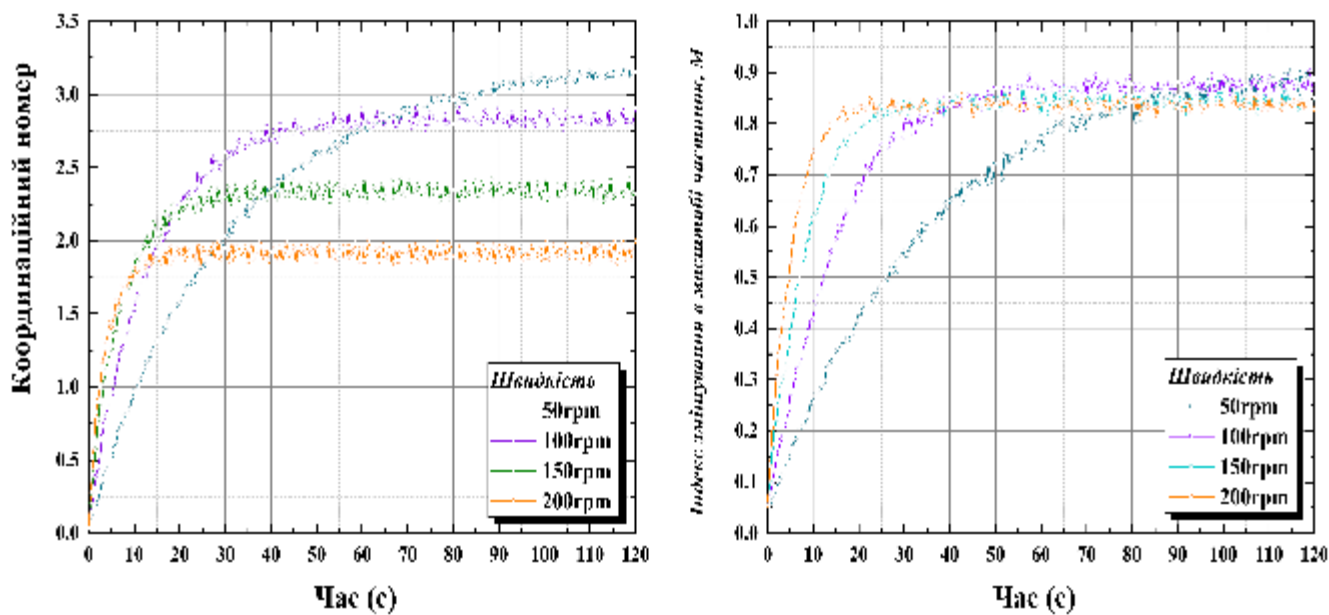
Рисунок 4.3 – Профілі еволюції в часі коефіцієнтів дисперсії твердого тіла в напрямках координати X (а), координати Y (б) і координати Z (в)

Всі коефіцієнти дисперсії в трьох напрямках коливаються навколо постійних значень, що є результатом хаотичних і турбулентних властивостей гранульної системи. У радіальному напрямку коефіцієнт дисперсії зростає зі

збільшенням рівня заповнення, що свідчить про сильніший обертальний рух, що узгоджується з результатами розподілу швидкостей на рис. 4.2 (а). Відомо, що стрічкові змішувачі мають погані можливості змішування в осьовому напрямку. Тому порівняно з інтенсивністю дисперсії в X- і Y-координатних напрямках (рис. 4.3 (а, б)), нижчий коефіцієнт дисперсії в Z-координатному напрямку спостерігається на рис. 4.3 (в), що свідчить про слабшу інтенсивність дисперсії в осьовому напрямку. Анізотропія вказує на сильний вплив обертання лопаток на коефіцієнт дисперсії частинок. У цьому дослідженні використовуються частинки, розташовані в осьовому боковому завантаженні, для вивчення поведінки змішування в стрічковому змішувачі. Тому осьове змішування буде домінуючим фактором. Відповідно, швидкість змішування зменшується зі збільшенням рівня заповнення, як показано на рис. 4.2 (б).

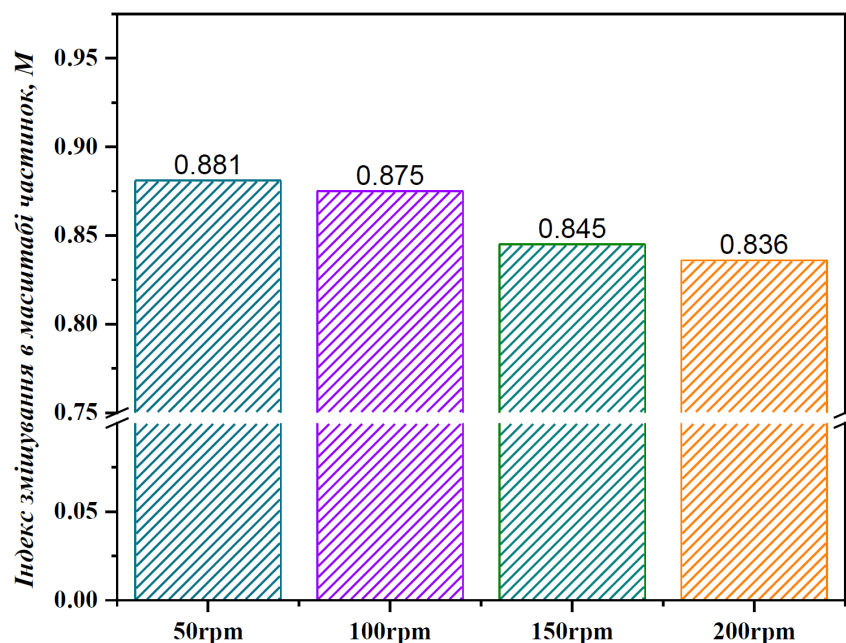
4.2 Вплив швидкості обертання лопаток на поведінку змішування

На рисунку 4.4 (а) видно, що середні значення CN починаються з нуля для всіх систем змішування. Оскільки проникнення різних частинок відбувається завдяки лопаткам, кількість зіткнень між частинками швидко зростає. Криві середнього CN демонструють суттєві відмінності при різних швидкостях обертання лопаток. Збільшення швидкості обертання лопаток покращує ймовірність зіткнень частинок з іншими типами частинок. Тому спостерігається швидше зростання значень CN при вищих швидкостях обертання лопаток. Після 100 с всі криві чисел координації досягають стадії динамічної рівноваги і кількісно оцінюються з часом. Середні значення CN для рівнів заповнення 20%, 30%, 40% і 50% на стадії динамічної рівноваги становлять 3.12, 2.83, 2.34 і 1.92 відповідно, що означає, що збільшення швидкості обертання лопаток зменшує загальне CN різних частинок. Це результат нульового контакту частинок, які "літають" у зоні вільного простору через високу швидкість обертання лопаток.



а

б



в

Рисунок 4.4 – Середнє CN між двома типами частинок протягом часу (а); профілі зміни в часі індексів змішування Лейсі стрічкових міксерів з різними швидкостями обертання (б); усереднені за часом індекси змішування мішалок з різними швидкостями обертання (в)

Рисунок 4.4 (б) кількісно порівнює часову еволюцію індексів змішування Лейсі при різних швидкостях обертання лопаток. Швидкість обертання лопаток суттєво впливає на стан змішування під час процесу змішування. Зі

збільшенням швидкості обертання лопаток досягається швидше змішування, де для 50 об/хв потрібно 100 с, для 100 об/хв — 60 с, для 150 об/хв — 40 с, а для 200 об/хв — 20 с для досягнення стабільного стану змішування. Після усереднення індексів змішування після досягнення стійкого стану, як показано на рис. 4.4(в), можна побачити, що кінцевий ступінь змішування трохи зменшується зі збільшенням швидкості обертання лопаток.

Для глибшого аналізу поведінки частинок у змішувачі, рис. 4.5 (а) показує поздовжні і радіальні вектори швидкості частинок для різних швидкостей обертання лопаток на $t = 100$ с. Швидкість обертання лопаток 200 об/хв демонструє значно більшу швидкість у посудині, ніж в інших випадках. Частинки в основному рухаються в окружному напрямку, за винятком середньої частини, де можна спостерігати деякі осьові рухи частинок. Окружний потік частинок збільшується зі збільшенням швидкості обертання лопаток. Для низьких швидкостей обертання лопаток 50 і 100 об/хв можна спостерігати локальну рециркуляцію частинок. На противагу цьому, високі швидкості обертання лопаток 150 і 200 об/хв схильні рухатися окружним напрямком майже по повному колу, що чітко видно в радіальному розрізі посудини.

Для кількісного порівняння підраховані компоненти швидкості в напрямках X-, Y- і Z-координат для всіх частинок при різних швидкостях обертання лопаток. Розподіли ймовірностей тимчасових компонентів швидкості на $t = 100$ с показані на рис. 4.5 (б, в, г). Розподіл ймовірностей можна апроксимувати нормальним розподілом навколо нульової швидкості, що вказує на велику частину нерухомих частинок і симетричні потоки на обох половинах U-подібної посудини. Пропорція високих швидкостей зростає зі збільшенням швидкостей обертання лопаток у всіх трьох координатних напрямках.

Рисунок 4.6 показує часові еволюційні профілі коефіцієнтів дисперсії твердої фази в X-, Y- і Z-координатних напрямках. Вплив швидкості обертання лопаток на інтенсивність дисперсії демонструє суттєву різницю в системі. Зі

збільшенням швидкості обертання лопаток інтенсивність дисперсії підвищується у всіх трьох напрямках.

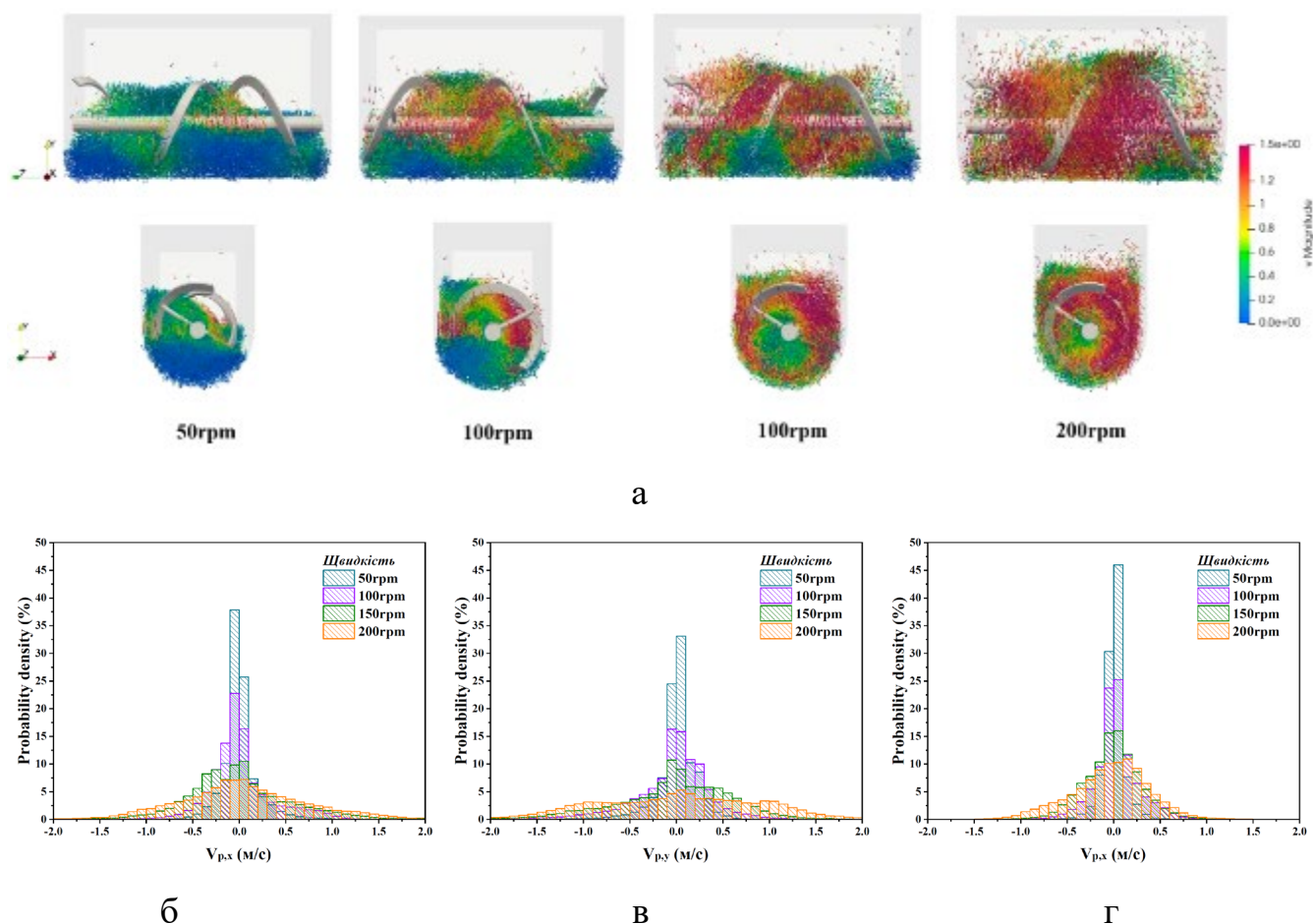


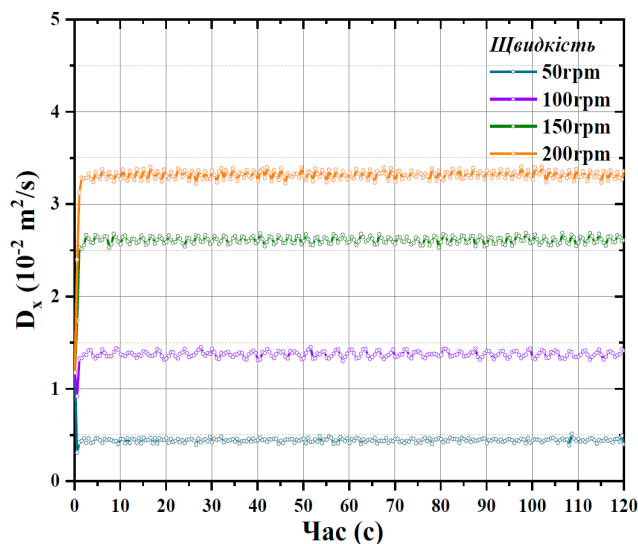
Рисунок 4.5 – Розподіл швидкостей частинок у змішувачі з різною швидкістю обертання (а) та розподіл щільності ймовірності компонентів за координатою X (б), координатою Y (в) та координатою Z (г) швидкостей у змішувачі з різними швидкостями обертання при $t = 100$ с

Зі збільшенням швидкості обертання лопаток посилюються взаємодії частинок між собою і частинок зі стінками в змішувачі.

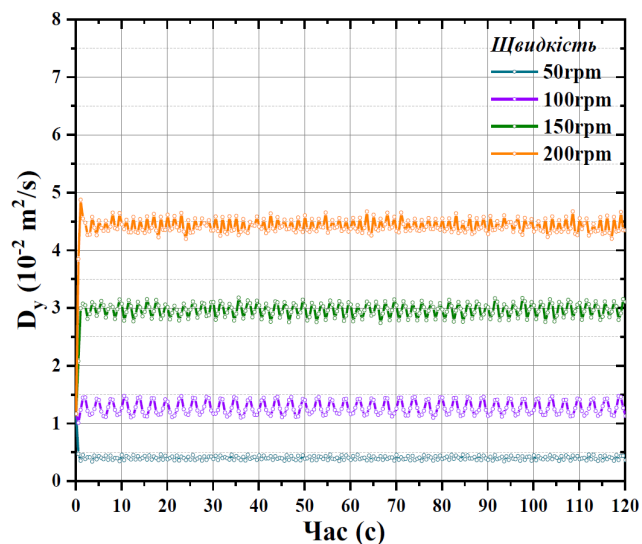
4.3 Вплив густини частинок на поведінку змішування

На рисунку 4.7 (а) видно, що середні значення CN починаються з нуля для всіх систем змішування. Оскільки проникнення різних частинок

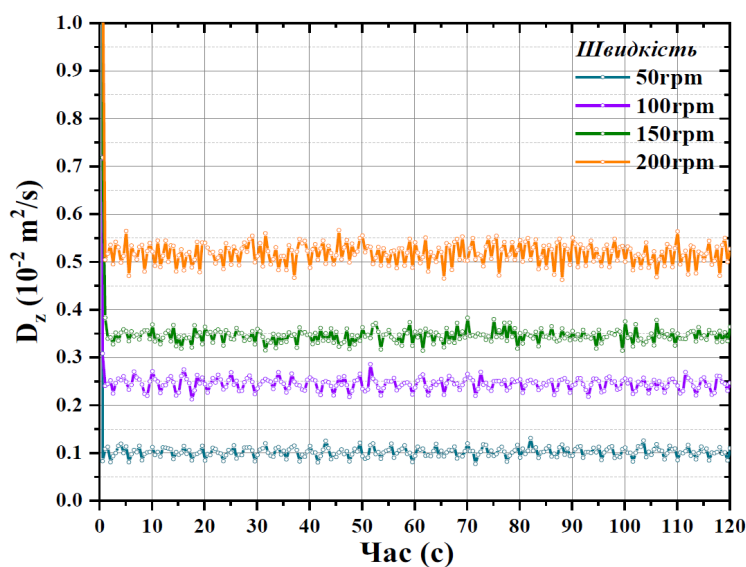
відбувається завдяки лопаткам, кількість зіткнень між частинками швидко зростає. Криві середніх значень CN показують незначні відмінності при різних густинах частинок.



а



б

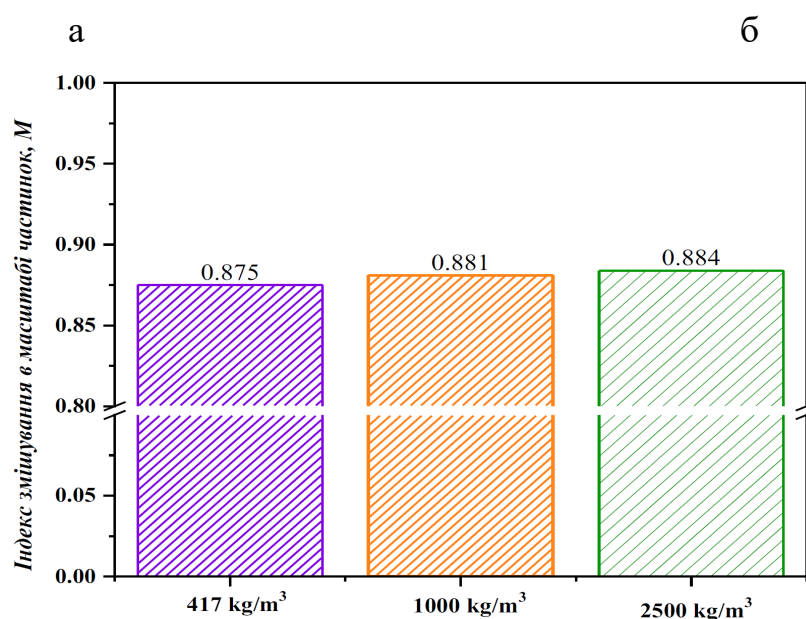
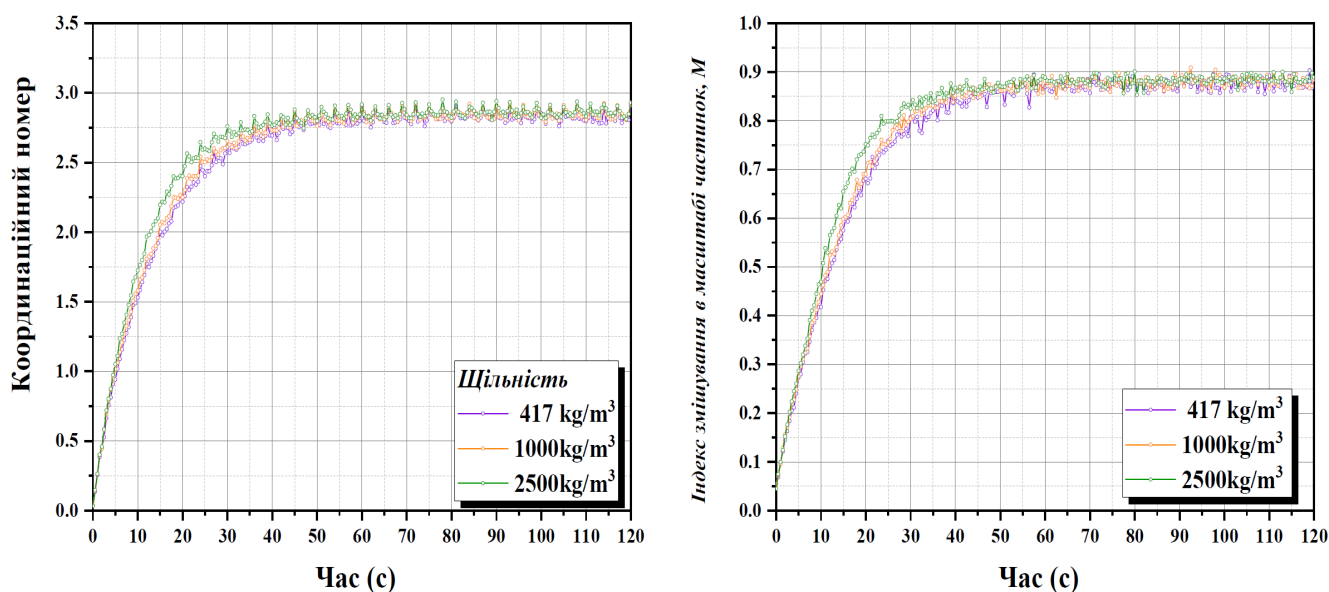


в

Рисунок 4.6 – Профілі еволюції в часі коефіцієнтів дисперсії твердого тіла в напрямках координати X (а), координати Y (б) і координати Z (в)

Після 80 с всі криві CN досягають стадії динамічної рівноваги і кількісно оцінюються з часом. Середні значення CN для густини частинок 417, 1000 і 2500 $\text{кг}/\text{м}^3$ на стадії динамічної рівноваги становлять 2.83, 2.85 і 2.86 відповідно,

що означає, що збільшення густини частинок незначно підвищує загальне CN різних частинок. Це пов'язано з тим, що більш густі частинки менш схильні до розсіпання через гравітацію і мають більшу ймовірність контакту з іншими частинками. Вплив густини на CN є незначним.



В

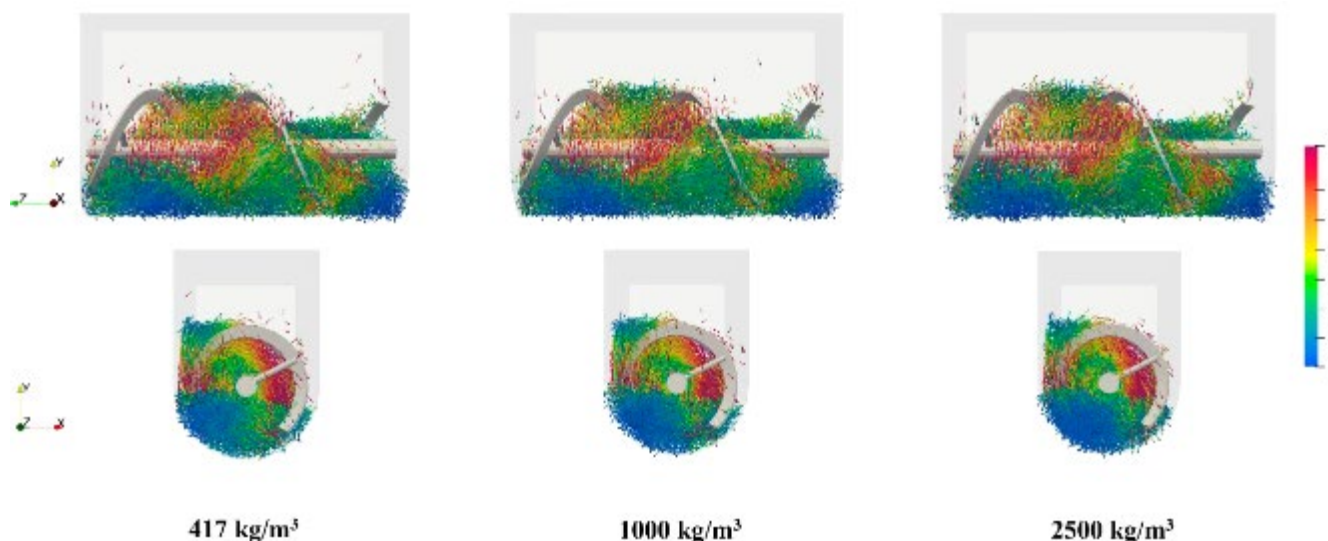
Рисунок 4.7 – Середнє CN між двома типами частинок протягом часу (а); профілі зміни в часі індексів змішування Лейсі стрічкових змішувачів з різною щільністю частинок (б); усереднені за часом індекси змішування змішувачів з різною густиною частинок (в)

Криві змішування змінюються незначно, коли густина матеріалу частинок змінюється від 417 до 2500 кг/м³. Результати узгоджуються з попередніми дослідженнями. У цьому дослідженні більша густина матеріалу призводить до трохи швидшого процесу змішування, як показано на рисунку 4.7 (б). Середні індекси змішування обчислені для подальшого порівняння впливу густини частинок шляхом усереднення тимчасових індексів змішування після досягнення системою стійкого стану. Усереднюючи індекси змішування з 80 с до 120 с, можна побачити на рисунку 4.7 (в), що кінцевий ступінь змішування трохи підвищується зі збільшенням густини частинок, де середні індекси змішування становлять 0.875, 0.881, 0.875 і 0.884 для густин 417, 1000 і 2500 кг/м³ відповідно.

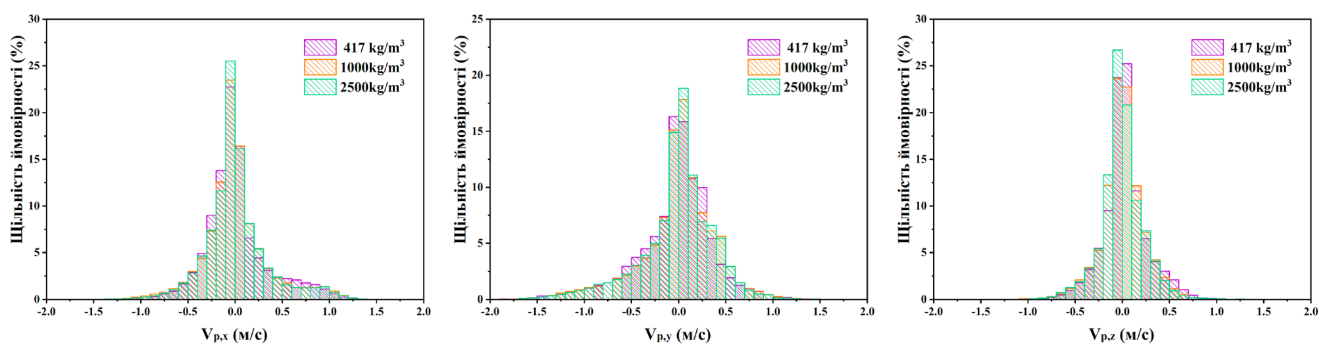
Рисунок 4.8 (а) показує поздовжні і радіальні вектори швидкості частинок у посудині змішувача з різними густинами частинок на $t = 100$ с. Спостерігається незначна різниця зі збільшенням густини частинок. Для кількісного порівняння підраховані компоненти швидкості в трьох напрямках для всіх частинок. Розподіли ймовірностей тимчасових компонентів швидкості на $t = 100$ с показані на рисунку 4.8 (б, в, г). Для всіх трьох координатних напрямків розподіл ймовірностей має тенденцію до нормального розподілу навколо нульової швидкості, що означає, що велика частина частинок, розташованих між двома сусідніми лопатками, є нерухомою. У порівнянні є незначні відмінності для трьох різних густин у всіх координатних напрямках.

Рисунок 4.9 показує часові еволюційні профілі коефіцієнтів дисперсії твердої фази в X-, Y- і Z-координатних напрямках відповідно. Існує незначна різниця зі збільшенням густини частинок, особливо в напрямку Z-координати.

Загальна нормальна сила на частинки головним чином викликана обертанням лопаток і взаємодіями між частинками. Контактні сили зростають зі збільшенням густини частинок через великі взаємодії частинка-частинка і частинка-стіна, викликані великою гравітацією частинок.



а



б

в

г

Рисунок 4.8 – Розподіл швидкостей частинок у змішувачі з різною густиною частинок (а) та розподіл щільності ймовірності компонентів за координатою X (б), координатою Y (в) та координатою Z (г) швидкостей у змішувачі з різною густиною частинок при $t = 100$ с

4.4 Вплив розміру частинок на поведінку змішування

На рисунку 4.10 (а) видно, що криві середніх значень CN демонструють значні відмінності для різних розмірів частинок. Збільшення розміру частинок зменшує ймовірність зіткнень частинок з іншими типами частинок.

Тому спостерігається повільніше зростання CN із збільшенням розміру частинок. Після $t = 80$ с всі криві CN досягають стадії динамічної рівноваги і кількісно оцінюються з часом. Середні значення CN для розмірів частинок 10, 15, 20 і 25 мм на стадії динамічної рівноваги становлять 3.17, 2.83, 2.48 і 2.32 відповідно, що означає, що збільшення розміру частинок зменшує загальне CN

різних частинок. Це пов'язано з тим, що більше частинок з маленькими розмірами відштовхуються лопатками для контакту з іншими частинками.

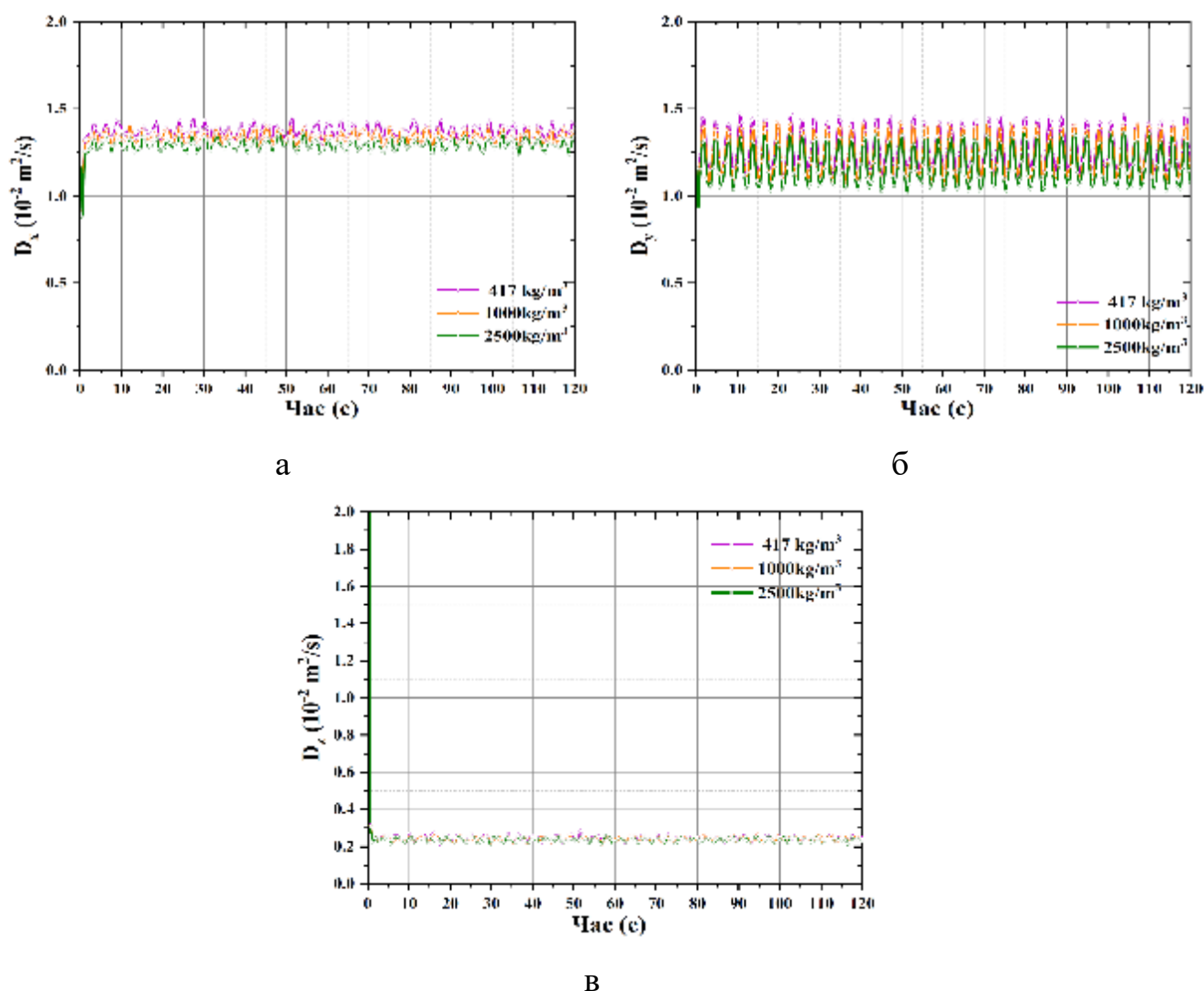


Рисунок 4.9 – Профілі еволюції в часі коефіцієнтів дисперсії твердого тіла в напрямках координати X (а), координати Y (б) і координати Z (с)

Рисунок 4.10 (б) кількісно порівнює еволюцію індексів змішування Лейсі для різних розмірів частинок. Розмір частинок значно впливає на стан змішування під час процесу змішування. Порівняно з цим, швидкість змішування трохи зростає зі збільшенням розміру частинок на початковій стадії змішування. Проте середній ступінь змішування системи зменшується зі збільшенням розміру частинок, як показано на рисунку 4.10 (в), шляхом усереднення індексів змішування з 80 с до 120 с.

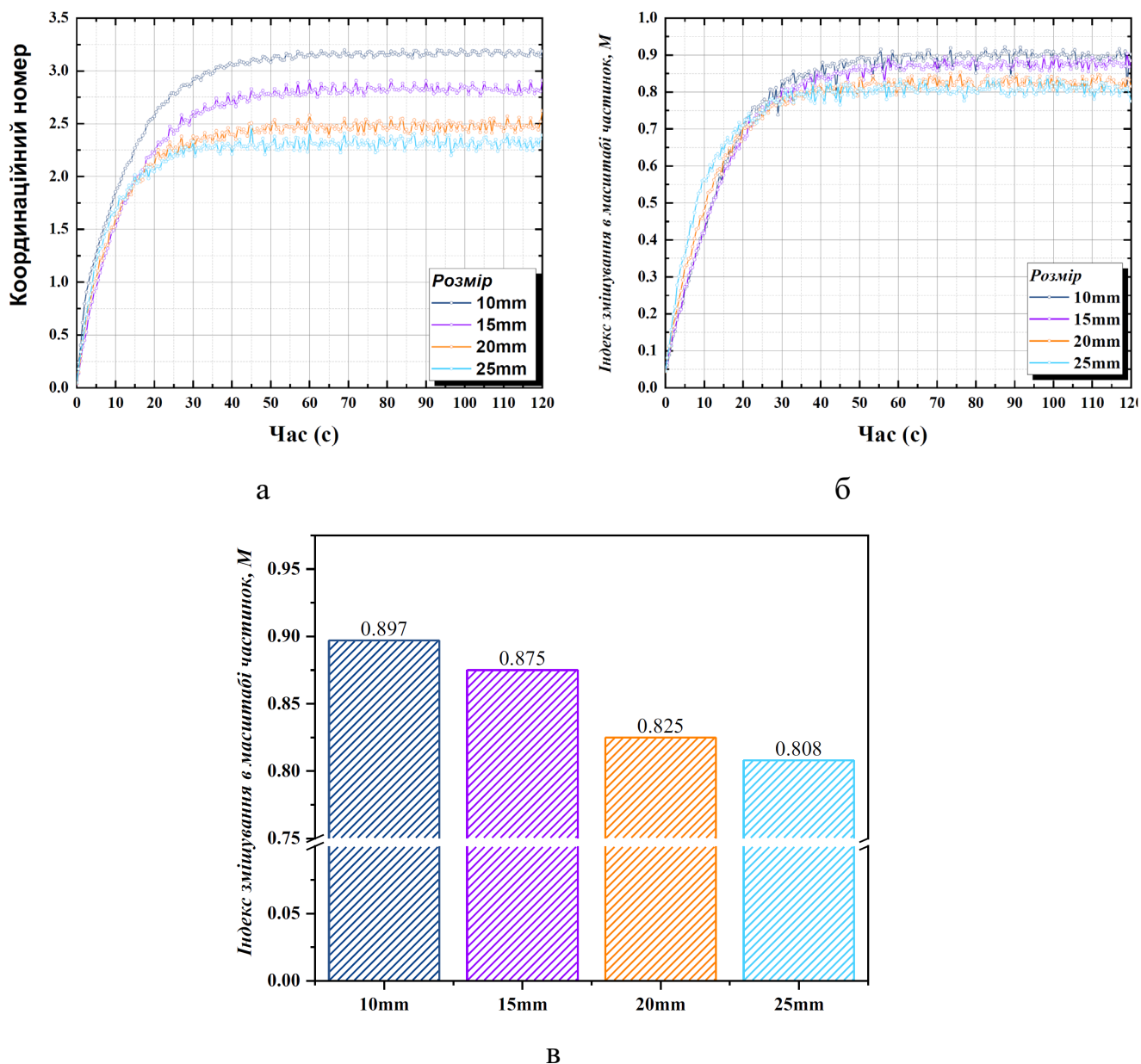
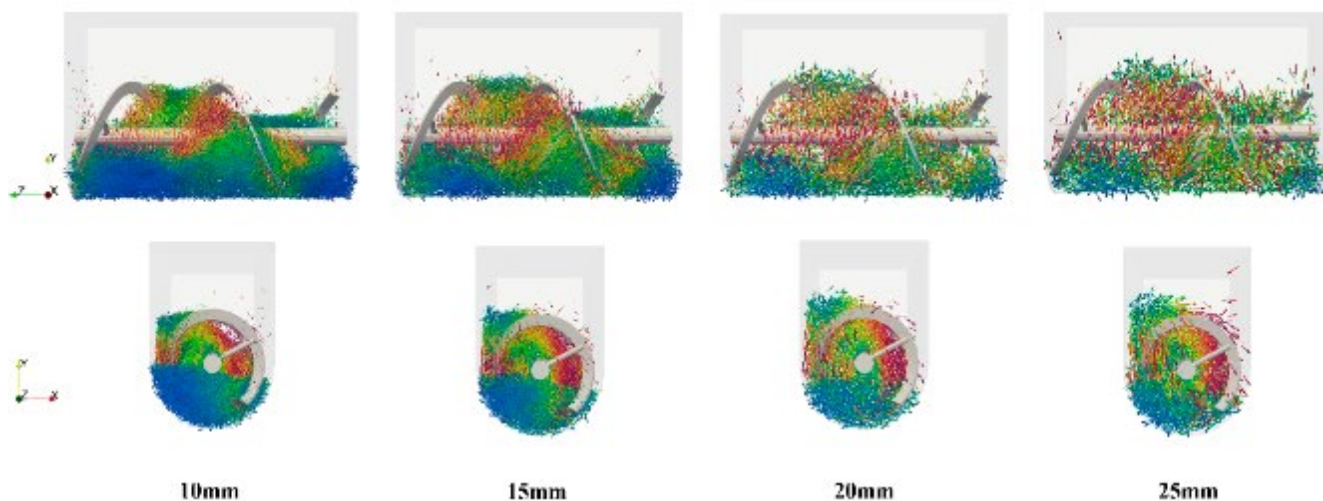


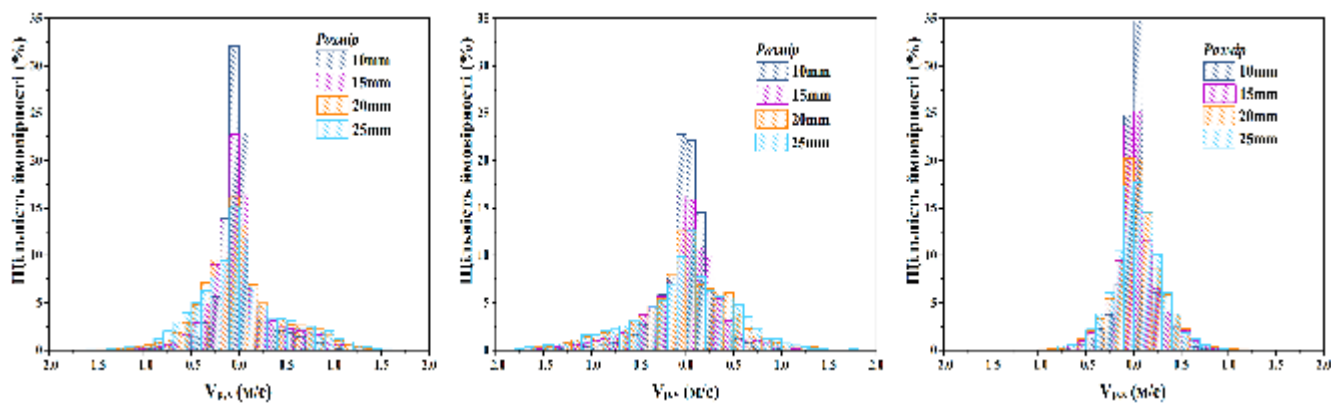
Рисунок 4.10 – Середнє CN між двома типами частинок протягом часу (а); профілі зміни в часі індексів змішування Лейсі стрічкових міксерів з різними розмірами частинок (б); усереднені за часом індекси змішування змішувачів із різними розмірами частинок (в)

Рисунок 4.11 (а) показує поздовжні і радіальні вектори швидкості частинок у посудині змішувача з різними розмірами частинок на $t = 100$ с. Частинки діаметром 25 мм розподіляються в посудині більш помітно, ніж частинки інших розмірів. Частинки рухаються переважно в циркулярному напрямку, за винятком середньої частини, де можна спостерігати деякі осьові рухи частинок. Циркулярний потік частинок збільшується зі збільшенням

розміру частинок. Такий рух частинок викликаний більшим імпульсом більших частинок під час змішування.



а



б

в

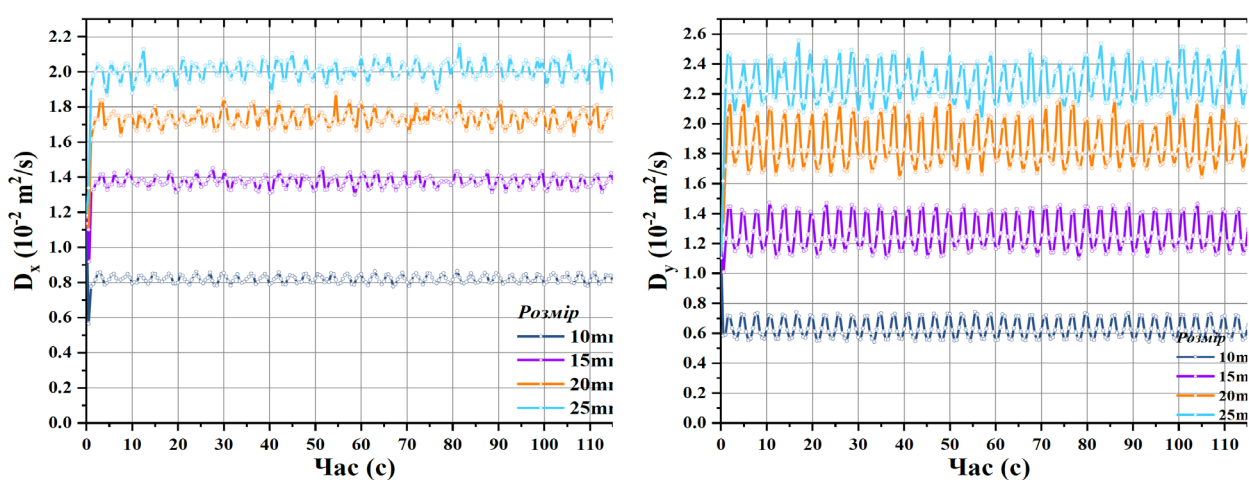
г

Рисунок 4.11 – Розподіл швидкостей частинок у змішувачі з різними розмірами частинок (а) та розподіл щільності ймовірності компонентів за координатою X (б), координатою Y (в) і координатою Z (г) швидкостей у змішувачі з різними розмірами частинок при $t = 100$ с

Для кількісного порівняння підраховані компоненти швидкості в трьох напрямках для всіх частинок у трьох змішувачах. Розподіли ймовірностей тимчасових компонентів швидкості на $t = 100$ с показані на рисунках 4.11(б, в, г). Можливість частинок з великими швидкостями зростає зі збільшенням розміру частинок.

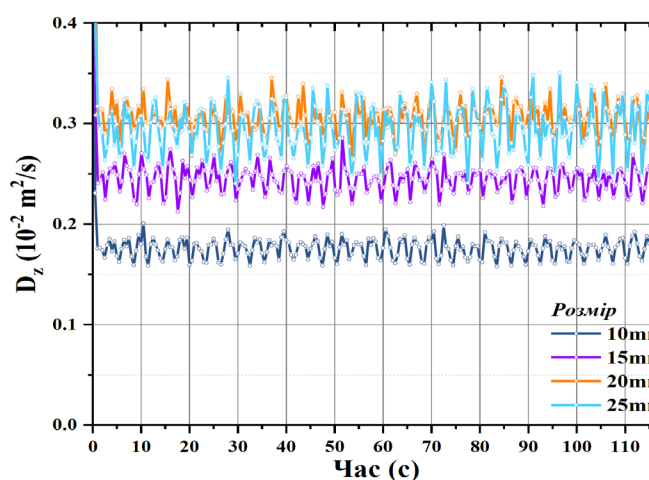
Рисунок 4.12 показує часові еволюційні профілі коефіцієнтів дисперсії твердої фази в трьох напрямках. Вплив розміру частинок на інтенсивність дисперсії показує помітну різницю в системі. Зі збільшенням розміру частинок інтенсивність дисперсії зростає в усіх трьох напрямках.

Контактні сили зростають зі збільшенням розміру частинок через великі взаємодії частинка-частинка і частинка-стіна, викликані великою гравітацією частинок.



а

б



в

Рисунок 4.12 – Профілі еволюції в часі коефіцієнтів дисперсії твердого тіла в напрямках координати X (а), координати Y (б) і координати Z (в)

4.5 Залежність якості змішування від факторів досліджень

Результуюча таблиця ANOVA для зменшеної квадратичної моделі процесу змішування наведена в таблиці 4.1. Результати зменшеної моделі показують, що ця модель все ще є значущою, оскільки Р-значення менше 0,05, а значення F дорівнює 0,85, що вказує на те, що F не є значущим відносно чистої помилки. Існує 63,87% ймовірності, що таке велике значення F могло виникнути через шум. Немає значущого F, що є добре для адекватності моделі. Прогнозоване R^2 , яке дорівнює 0,9571 у Таблиці 4-6, розумно погоджується з скоригованим R^2 , що дорівнює 0,9695; тобто, різниця менша за 0,2. Це демонструє, що понад 95% змінності в даних пояснюється цією моделлю.

Таблиця 4.1 – ANOVA для квадратичної моделі

Джерело	Сума квадратів	Кількість ступенів свободи	Середній квадрат	Значення F	Р-значення	Значущість
Модель	0,0969	14	0,0069	65,09	< 0,0001	Значуща
A	0,0537	1	0,0537	504,70	< 0,0001	Значуща
B	0,0126	1	0,0126	118,38	< 0,0001	Значуща
C	0,0002	1	0,0002	2,19	0,1598	Не значуща
D	0,0272	1	0,0272	256,03	< 0,0001	Значуща
AB	0,0009	1	0,0009	8,63	0,0102	Значуща
AC	0,0000	1	0,0000	0,28	0,6076	Не значуща
AD	0,0001	1	0,0001	0,62	0,4425	Не значуща
BC	0,0001	1	0,0001	0,59	0,4528	Не значуща
BD	$9,68 \cdot 10^{-06}$	1	$9,68^{-06}$	0,09	0,7669	Не значуща
CD	0,0001	1	0,0001	0,95	0,3460	Не значуща
A ²	0,0014	1	0,0014	13,00	0,0026	Значуща
B ²	0,0002	1	0,0002	1,69	0,2133	Не значуща
C ²	0,0006	1	0,0006	5,38	0,0348	Значуща
D ²	0,0005	1	0,0005	5,08	0,0396	Значуща
Резидуальні	0,0016	15	0,0001	-	-	-
F	0,0010	10	0,0001	0,86	0,6072	Не значуща
Помилка	0,0006	5	0,0001	-	-	-
Кореляція	0,0985	29	-	-	-	-

Це також підтверджує, що ця модель забезпечує відмінне пояснення взаємозв'язку між незалежними факторами та відповіддю. F , що означає значення адекватної точності цієї моделі, вимірює співвідношення сигнал-шум. Бажано, щоб це співвідношення було більше 4. Співвідношення 39,549 у цій роботі вказує на адекватний сигнал. Цю модель можна використовувати для навігації в просторі дизайну.

Через процес зворотного відбору кінцеві квадратичні моделі рівняння відповіді у термінах закодованих факторів наведені в Таблиці 4-7 і можуть бути записані як:

$$\begin{aligned} \bar{M} = & 0.7977 + 0.0473A - 0.0229B - 0.0337D + 0.0076AB - 0.0067A^2 \\ & - 0.0042C^2 - 0.0041D^2 \end{aligned} \quad (4.2)$$

Отримана модель може бути використана для прогнозування значень середнього ступеня змішування в стабільному стані в межах досліджуваних факторів.

Рис. 4.13 показує діагностичний графік залишків квадратичної моделі.

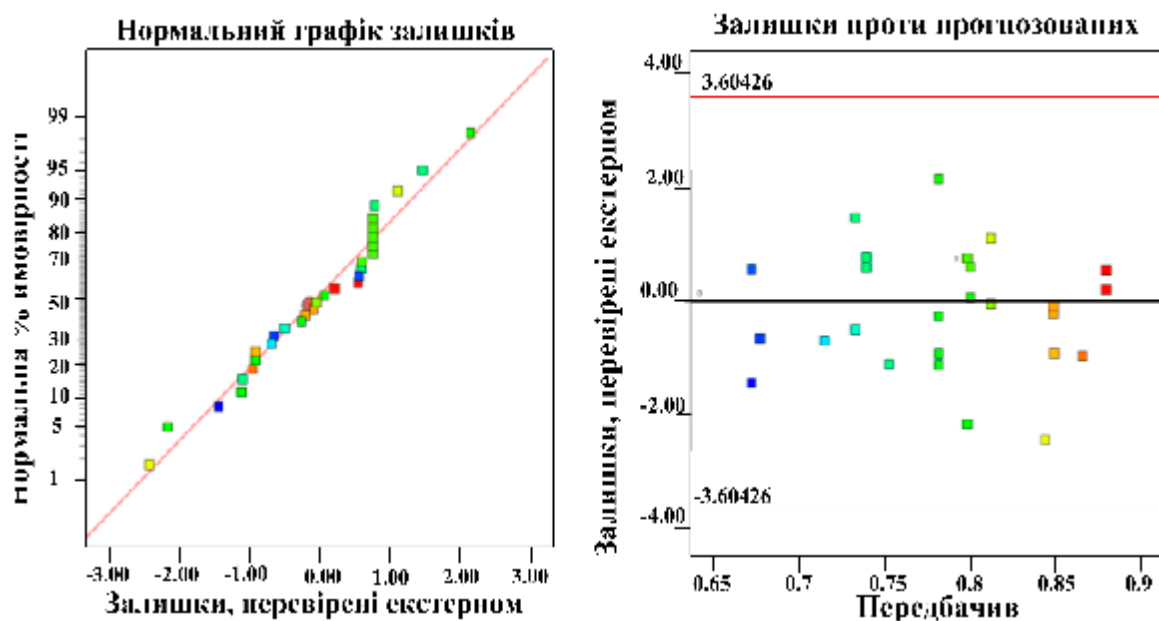
Рис. 4.13 (а) представляє нормальний графік залишків, які досить близькі до прямої лінії, що ще раз підтверджує адекватність моделі у описі зв'язку між незалежними змінними та кінцевим ступенем змішування.

Рис. 4.13 (б) є графіком залишків проти передбачених значень рівняння. Залишки розкидані випадковим чином, причому більше розкидані та нерегулярні показники вказують на кращу прогностичну здатність рівняння.

Рис. 4.13 (с) демонструє порівняння передбачених та випробуваних значень кінцевого ступеня змішування. Лінійний розподіл відображає гарну відповідність моделі, що дозволяє аналізувати та прогнозувати кінцевий ступінь змішування.

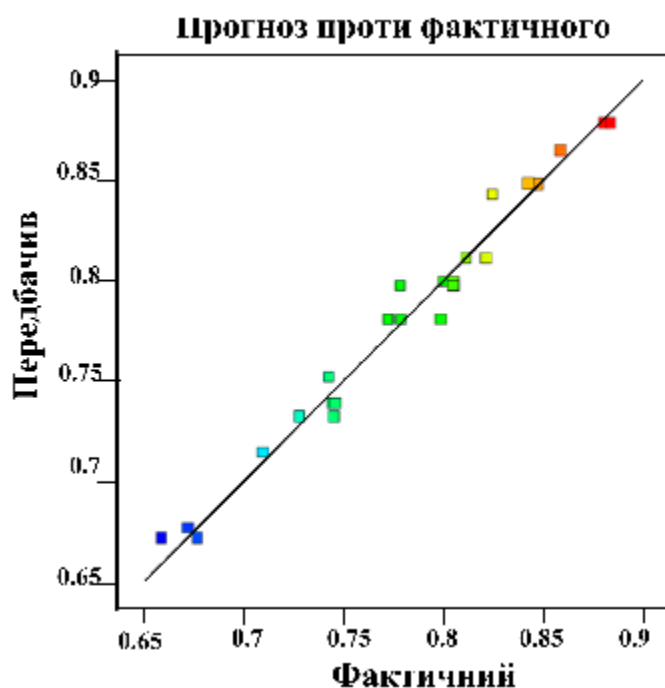
У цій роботі досліджено впливи умов роботи, таких як рівень заповнення і швидкість обертання мішалки, а також властивостей часток, таких як густина часток і розмір часток, на поведінку змішування в промисловій U-подібній стрічковій мішалці з використанням симуляції DEM. Продуктивність

змішування аналізується за допомогою індексу змішування Лейсі з кількох аспектів.



а

б



в

Рисунок 4.13 – Діагностика залишків квадратичної моделі: нормальний графік залишків (а); залишки проти прогнозованих (б); прогнозовані проти фактичних (в)

4.6 Висновки з розділу

1. Рівень заповнення, швидкість обертання змішувача і розмір часток мають значний вплив на продуктивність змішування, тоді як густина часток показує незначний ефект. Зі збільшенням швидкості обертання мішалки і розміру часток загальна кількість контактів між різними частками і кінцевий ступінь змішування зменшуються; більша частка часток піддається великим нормальним силам; ймовірність часток з високими швидкостями і інтенсивність розподілу часток збільшуються. Крім того, зі збільшенням рівня заповнення збільшується обіговий потік часток; в радіальному напрямку спостерігається зменшення ймовірності знаходження часток в нерухомому стані, а коефіцієнт розподілу часток зростає, що вказує на сильніший обіговий рух; в аксіальному напрямку більша частка часток має низькі швидкості, і спостерігається низький коефіцієнт розподілу часток, що свідчить про слабку інтенсивність розподілу.

2. Аналіз множинної регресії вказує на значну роль рівня заповнення, швидкості обертання мішалки і діаметра часток у впливі на кінцевий ступінь моделі і незначну роль густини часток. Модель другого порядку поліноміальної регресії середнього ступеня змішування у стабільному стані отримана за допомогою RSM з методом CCD, де понад 95% варіації в межах вивчених факторів пояснюється цією моделлю.

5 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

Оцінка небезпечних та шкідливих факторів у робочому середовищі. Експлуатація змішувача кормів у кормоцеху супроводжується кількома небезпечними і шкідливими факторами, які можуть вплинути на здоров'я і безпеку працівників. Основні з них включають:

1. Механічні небезпеки: змішувач кормів має обертові частини, які можуть завдати травм при випадковому контакті; наявність гострих лез та інших механічних компонентів також може бути небезпечною.

2. Електричні небезпеки: змішувачі кормів працюють від електричної енергії, що може викликати електротравми у випадку порушення правил електробезпеки або несправності електричного обладнання.

3. Шумове навантаження: робота змішувача супроводжується високим рівнем шуму, що може призвести до втрати слуху або інших проблем зі здоров'ям, якщо не використовуються засоби захисту.

4. Пилові та аерозольні викиди: під час роботи змішувача може утворюватися пил або аерозолі кормів, які можуть негативно впливати на дихальні шляхи працівників, викликати алергії та інші респіраторні захворювання.

5. Теплові небезпеки: змішувач може виділяти тепло під час роботи, що може призвести до перегріву або опіків при контакті з гарячими частинами обладнання.

Методи захисту працівників від впливу небезпечних і шкідливих факторів

1. Механічний захист:

- Установка захисних кожухів на обертові частини змішувача для запобігання випадковому контакту.

- Регулярне технічне обслуговування і перевірка обладнання для усунення можливих несправностей і зменшення ризику травмування.

2. Електрична безпека:

- Використання обладнання, яке відповідає вимогам електробезпеки.
- Регулярна перевірка і обслуговування електричних систем, установка захисних пристроїв (автоматичних вимикачів, заземлення).

3. Шумозахист:

- Використання шумозахисних засобів (вушних захисників, навушників).
- Організація робочого місця з урахуванням акустичних норм, зменшення рівня шуму за допомогою шумопоглинальних матеріалів.

4. Захист від пилу і аерозолів:

- Установка систем вентиляції та пиловидалення для зменшення концентрації пилу в повітрі.
- Використання респіраторів і масок для захисту дихальних шляхів.

5. Тепловий захист:

- Використання термозахисних рукавичок і спеціального одягу для захисту від перегріву.
- Регулярне провітрювання приміщення і забезпечення адекватної температури на робочому місці.

Правила безпечного виконання робіт при роботі із обладнанням для приготування кормів

1. Підготовка до роботи:

- Ознайомлення з інструкціями з експлуатації змішувача кормів.
- Перевірка технічного стану обладнання перед початком роботи.

2. Безпосередньо під час роботи:

- Дотримання правил безпеки і використання засобів індивідуального захисту.
- Не допускати перебування сторонніх осіб у зоні роботи змішувача.

3. Операції з технічного обслуговування:

- Вимикання обладнання і знеструмлення перед проведенням будь-яких ремонтних або технічних робіт.

- Виконання обслуговування тільки кваліфікованими фахівцями.

4. Навчання і інструктаж:

- Проведення регулярних інструктажів і тренінгів для працівників щодо правил безпеки та дій у випадку надзвичайних ситуацій.

Дії під час надзвичайних ситуацій:

1. У разі пожежі:

- негайно повідомити про пожежу і викликати пожежну службу.
- Вимкнути електропостачання до змішувача.
- Використовувати вогнегасники для гасіння вогню (якщо це безпечно).
- Здійснити евакуацію працівників з небезпечної зони.

2. У разі електричної аварії:

- Вимкнути електроживлення до обладнання.
- Уникати контакту з пошкодженими електричними компонентами.
- Повідомити відповідальні служби для усунення несправності.

3. У разі травмування працівників:

- Надати першу медичну допомогу і викликати швидку медичну допомогу.
- Визначити причину травми і вжити заходів для запобігання подальшим інцидентам.

4. У разі надмірного шуму або пилу:

- негайно припинити роботу і перевірити обладнання.
- Ужити заходів для зменшення рівня шуму або пилу.
- Інформувати керівництво про ситуацію і вжити заходів для її усунення.

Забезпечення охорони праці та безпеки на робочих місцях є важливим аспектом для підтримки здоров'я працівників та ефективної роботи виробництв. Правильне управління ризиками і своєчасне реагування на надзвичайні ситуації допоможуть знизити ймовірність травм та аварій, забезпечуючи безпечні умови праці в кормоцеху.

6 ЕКОНОМІЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ СТРІЧКОВОГО ЗМІШУВАЧА КОРМІВ

Економічне обґрунтування вибору обладнання є важливою складовою ефективної роботи будь-якого підприємства. У сучасних умовах технічні удосконалення часто стають основним чинником для підвищення продуктивності, зниження витрат та оптимізації виробничих процесів. У даному дослідженні проводиться економічне порівняння базової конструкції змішувача МКУ-1,2 та удосконаленого стрічкового змішувача. Основною метою є визначення доцільності використання удосконаленого обладнання на основі річних витрат та економічного ефекту.

Базовий змішувач МКУ-1,2 має продуктивність 280 кг/год, тоді як удосконалений змішувач забезпечує підвищену продуктивність на рівні 310 кг/год, що є на 10,7% більшим показником. Вартість базової конструкції становить 60 000 грн, а вартість удосконаленого змішувача збільшена на 10% і становить 66 000 грн. Підприємство щорічно потребує вироблення 300 000 кг корму, що є вихідною умовою для розрахунку експлуатаційних витрат обладнання.

Кількість обслуговуючого персоналу залишається незмінною для обох змішувачів і становить одну особу, при цьому тарифна ставка працівника складає 120 грн/год. Середньорічний коефіцієнт відрахувань на амортизацію прийнятий на рівні 15%, а на ремонт і технічне обслуговування – 10%. Крім того, в розрахунках враховано потужність електродвигуна змішувача, яка становить 4 кВт, та вартість електроенергії 5,6 грн/кВт·год.

Витрати на оплату праці. На основі продуктивності змішувачів було розраховано кількість годин, необхідних для вироблення 300 000 кг корму за рік. Базовий змішувач потребує 1071,43 год, тоді як удосконалений – лише 967,74 год, що знижує загальний час роботи на 103,69 год. Відповідно, річні витрати на оплату праці для базового змішувача складають 128 571,43 грн, а для удосконаленого – 116 129,03 грн. Зниження витрат на оплату праці внаслідок використання удосконаленого змішувача становить 12 442,4 грн.

Амортизація та ремонт. Річні амортизаційні відрахування для базового змішувача становлять 9 000 грн, а для удосконаленого – 9 900 грн через вищу вартість обладнання. Витрати на ремонт і технічне обслуговування оцінюються в 6 000 грн для базової конструкції і 6 600 грн для удосконаленого змішувача. Загальні витрати на амортизацію і ремонт для удосконаленого змішувача є вищими на 1 500 грн, однак цей показник компенсується за рахунок зниження витрат на інші складові.

Електроенергія. Енергоспоживання обох змішувачів визначається на основі їх продуктивності та кількості годин роботи. Базовий змішувач споживає електроенергії на суму 24 000 грн на рік, тоді як удосконалений споживає 21 677,42 грн, що забезпечує економію 2 322,58 грн.

Загальні витрати. Загальні річні витрати для базового змішувача складають 167 571,43 грн, а для удосконаленого – 154 306,45 грн. Таким чином, річна економія при використанні удосконаленого змішувача становить 13 264,98 грн.

Економічний ефект та строк окупності. Загальні капіталовкладення в удосконалений змішувач на 6 000 грн більші порівняно з базовою конструкцією. Враховуючи річну економію, строк окупності додаткових капіталовкладень становить 0,45 року, або близько 5,5 місяців. Це свідчить про високу доцільність використання удосконаленого змішувача, оскільки він забезпечує швидке повернення інвестицій та подальше зниження експлуатаційних витрат.

Економічне порівняння базового та удосконаленого змішувачів демонструє переваги удосконаленої конструкції. Удосконалений змішувач не лише підвищує продуктивність, але й дозволяє знизити загальні річні витрати за рахунок скорочення часу роботи, економії електроенергії та зниження витрат на оплату праці. Додаткові капіталовкладення окуповуються менш ніж за півроку, що свідчить про доцільність інвестицій у модернізацію обладнання для підприємства.

ВИСНОВКИ

1. Зростання інтересу до самостійного виготовлення комбікормів на фермах пояснюється економічною доцільністю та доступністю малосерійних установок, при цьому особлива увага приділяється зниженню енерговитрат і використанню матеріалів без втрати якості продукції, що дозволяє підвищити ефективність виробництва комбікормів.

2. Поведінка частинок у системі змішувача є дуже складною, і механізм змішування частинок у всіх типах змішувачів ще далеко не зрозумілий, що є важливим для експлуатації та оптимізації. Розуміння та точний контроль поведінки частинок у процесі змішування частинок є складними завданнями. Тому глибоке розуміння змішування частинок є як науково фундаментальним, так і практично важливим для оптимізації відповідних промислових процесів. Зі швидким розвитком високопродуктивних паралельних обчислювальних технологій, метод дискретних елементів (DEM) стає потужним інструментом для вивчення складних гранульованих систем. Відповідна симуляційна робота для інших типів змішувачів дуже обмежена. Проте в практичній промисловості стрічковий змішувач використовується частіше, ніж ідеальний циліндричний, оскільки він зручніший для завантаження матеріалу та очищення. Проте симуляційні дослідження змішувачів дуже обмежені, і поведінка частинок при змішуванні все ще недостатньо зрозуміла, що перешкоджає подальшому розвитку та оптимізації ефективності промислового змішування твердих матеріалів.

3. Рух частинок у методі дискретних елементів (DEM) визначається законом збереження імпульсу для трансляційного та обертального рухів, з урахуванням контактних сил, демпфуючих сил, а також моментів сил і моментів кочення між частинками. Модель була верифікована експериментальними дослідженнями для забезпечення точності результатів. У дослідженні поведінки когезивних частинок в рамках методу дискретних елементів (DEM) розглядається взаємодія частинок через контактні сили, рідинний міст та сили демпфування. Модель когезії враховує капілярну і в'язку сили, які виникають через рідинний міст між частинками. В'язка

сила залежить від відносної швидкості частинок та в'язкості рідини, зменшуючись зі збільшенням відстані між частинками.

4. Рівень заповнення, швидкість обертання стрічкового змішувача і розмір частинок мають значний вплив на продуктивність змішування, тоді як густина частинок показує незначний ефект. Зі збільшенням швидкості обертання мішалки і розміру частинок загальна кількість контактів між різними частинками і кінцевий ступінь змішування зменшуються; більша частка частинок піддається значним нормальним силам; ймовірність частинок з високими швидкостями і інтенсивність розподілу частинок збільшуються. Крім того, зі збільшенням рівня заповнення збільшується обіговий потік частинок; в радіальному напрямку спостерігається зменшення ймовірності знаходження частинок в нерухомому стані, а коефіцієнт розподілу частинок зростає, що вказує на сильніший обіговий рух; в аксіальному напрямку більша частка частинок має низькі швидкості, і спостерігається низький коефіцієнт розподілу частинок, що свідчить про слабку інтенсивність розподілу. Аналіз множинної регресії вказує на значну роль рівня заповнення, швидкості обертання мішалки і діаметра частинок у впливі на кінцевий ступінь моделі і незначну роль густини частинок.

5. Проведено огляд охорони праці та безпеки в надзвичайних ситуаціях. Визначено механічні, електричні і теплові небезпеки, шумове навантаження, пилові та аерозольні викиди. Зазначено методи захисту працівників від впливу небезпечних і шкідливих факторів. Вказано правила безпечного виконання робіт при роботі з обладнанням для приготування кормів.

6. Економічне порівняння базового та удосконаленого змішувачів демонструє переваги удосконаленої конструкції. Удосконалений змішувач не лише підвищує продуктивність, але й дозволяє знизити загальні річні витрати за рахунок скорочення часу роботи, економії електроенергії та зниження витрат на оплату праці. Економія при використанні удосконаленого змішувача становить 13264,98 грн. Строк окупності додаткових капіталовкладень становить 0,45 року.

Бібліографія

1. Алієв, Е. Б., Миколенко, С. Ю., Сова, Н. А. та ін. (2022). Техніко-технологічне забезпечення безвідходної переробки зернової сировини у харчові продукти і корми: колективна монографія / за заг. ред. Е. Б. Алієва. Дніпро: ЛПРА. 192 с.
2. Кісільов, Р. В., Матвєєв, К. Д., Лузан, П. Г. (2013). Дослідження технологічної ефективності змішування кормів двоступеневим одновальним комбінованим змішувачем періодичної дії. Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин, 43 (II): 108–112.
3. Shevchenko, I., Aliiev, E. (2020). Improving the efficiency of the process of continuous flow mixing of bulk components. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 6/1 (108), 6-13. DOI: 10.15587/1729-4061.2020.216409
4. Mesnier, A., Peczalski, R., Mollon, G., Vessot-Crastes, S. (2020). Mixing of Bi-Dispersed Milli-Beads in a Rotary Drum. *Mechanical Segregation Analyzed by Lab-Scale Experiments and DEM Simulation. Processes*, 8 (9), 1166. DOI: 10.3390/pr8091166
5. Liao, C. C., Hsiaub, S. S., Nien, H. C. (2015). Effects of density ratio, rotation speed, and fill level on density-induced granular streak segregation in a rotating drum. *Powder Technology*, 284, 514–520. DOI: 10.1016/j.powtec.2015.07.030
6. Vargas, W. L., Hajra, S. K., Shi, D., McCarthy, J. J. (2008). Suppressing the Segregation of Granular Mixtures in Rotating Tumblers. *AIChE Journal*, 54, 3124–3132. DOI: 10.1002/aic.11640
7. Maione, R., De Richter, S.K., Mauviel, G., Wild, G. (2015). DEM investigation of granular flow and binary mixture segregation in a rotating tumbler: Influence of particle shape and internal baffles. *Powder Technology*, 286, 732–739. DOI: 10.1016/j.powtec.2015.09.011

8. Вислоух, С. П., Волошко, О. В., Тимчик, Г. С., Філіпова, М. В. (2021). Комп'ютерне моделювання процесів та систем. Чисельні методи: підручник. Київ: КЛІ ім. Ігоря Сікорського, Видавництво «Політехніка». 228 с.
9. Задачин, В. М., Конюшенко, І. Г. (2014). Чисельні методи: навчальний посібник. Х.: Вид. ХНЕУ ім. С. Кузнеця, 180 с.
10. Кисельов, О. В., Комарова, І. Б., Мілько, Д. О., Бакарджиєв, Р. О. (2017). Статистична обробка і оформлення результатів експериментальних досліджень (із досвіду написання дисертаційних робіт): Навчальний посібник. Запоріжжя: СТАТУС. 1181 с.
11. Алієв, Е. Б. (2023). Конспект лекцій з навчальної дисципліни «Чисельне моделювання процесів сільськогосподарського виробництва» для здобувачів другого (магістерського) рівня вищої освіти спеціальності 208 «Агроінженерія» ОПП «Агроінженерія». Дніпро: ДДАЕУ. 2023.
12. Алієв, Е. Б. (2023). Методичні рекомендації до практичних занять з навчальної дисципліни «Чисельне моделювання процесів сільськогосподарського виробництва» для здобувачів другого (магістерського) рівня вищої освіти спеціальності 208 «Агроінженерія» ОПП «Агроінженерія». Дніпро: ДДАЕУ.
13. Алієв, Е. Б. (2023). Методичні рекомендації для самостійного опрацювання тем програми дисципліни «Чисельне моделювання процесів сільськогосподарського виробництв», які не викладаються на аудиторних заняттях для здобувачів другого (магістерського) рівня вищої освіти спеціальності 208 «Агроінженерія» ОПП «Агроінженерія». Дніпро: ДДАЕУ.
14. Коновалов, В. В., Димитриев, Н. В., Кшникаткин, С. А., Чупшев, А. В. (2013). Обоснование угла установки емкости и длительности перемешивания сухих смесей барабанным смесителем. Нива Поволжья, №1 (26), 46-50.
15. Ревенко, І. І., Ачкевич, О. М. (2010). До обґрунтування математичної моделі процесу приготування сумішок білково-вітамінно-мінеральних комбікормових добавок. Науковий вісник національного

університету біоресурсів і природокористування України. Серія «Техніка та енергетика АПК», Вип. 144, Ч. 3.

16. Wang, Y., Hutter, K. (2001). Granular material theories revisited. *Geomorphological Fluid Mechanics*, Springer, 79-107.

17. Campbell, C. S. (2006). Granular material flows—an overview. *Powder Technology*, 162, 208-229.

18. Yang, W. J., Neoh, K.-G., Kang, E.-T., Teo, S.L.-M., Rittschof, D. (2014). Polymer brush coatings for combating marine biofouling. *Progress in Polymer Science*, 39, 1017-1042.

19. Ashton, M., Valentin, F.e. (1966). The mixing of powders and particles in industrial mixers. *Transactions of the Institution of Chemical Engineers*, 44, 166-188.

20. Kennedy, D., Norman, C. (2005). What don't we know. *Science*, 309, 75.

21. Ottino, J., Khakhar, D. (2001). Fundamental research in heaping, mixing, and segregation of granular materials: challenges and perspectives. *Powder Technology*, 121, 117-122.

22. Muzzio, F.J., Alexander, A., Goodridge, C., Shen, E., Shinbrot, T., Manjunath, K., Dhodapkar, S., Jacob, K. (2004). Solids mixing. *Handbook of Industrial Mixing*, 887-985.

23. Chou, S.-H., Song, Y.-L., Hsiau, S.-S. (2017). A study of the mixing index in solid particles. *KONA Powder and Particle Journal*, 34, 275-281.

24. Cho, M., Dutta, P., Shim, J. (2017). A non-sampling mixing index for multicomponent mixtures. *Powder Technology*, 319, 434-444.

25. Chandratilleke, G.R., Yu, A., Bridgwater, J., Shinohara, K. (2012). A particle-scale index in the quantification of mixing of particles. *AIChE Journal*, 58, 1099-1118.

26. Marigo, M., Cairns, D., Davies, M., Ingram, A., Stitt, E. (2012). A numerical comparison of mixing efficiencies of solids in a cylindrical vessel subject to a range of motions. *Powder Technology*, 217, 540-547.

27. Chaikittisilp, W., Taenumtrakul, T., Boonsuwan, P., Tanthapanichakoon, W., Charinpanitkul, T. (2006). Analysis of solid particle mixing in inclined fluidized beds using DEM simulation. *Chemical Engineering Journal*, 122, 21-29.
28. Park, C., Kim, J., Landon, R.S., Lyu, B., Cho, H., Moon, I. (2019). Novel evaluation method for the continuous mixing process of bimodal particles. *Powder Technology*, 344, 636-646.
29. Siiriä, S., Yliruusi, J. (2009). Determining a value for mixing: Mixing degree. *Powder Technology*, 196, 309-317.
30. Arntz, M., den Otter, W.K., Briels, W.J., Bussmann, P., Beeftink, H., Boom, R. (2008). Granular mixing and segregation in a horizontal rotating drum: a simulation study on the impact of rotational speed and fill level. *AIChE Journal*, 54, 3133-3146.
31. Chandratilleke, G., Jin, X., Shen, Y. (2021). DEM study of effects of particle size and density on mixing behaviour in a ribbon mixer. *Powder Technology*, 392, 93-107.
32. Jin, X., Chandratilleke, G.R., Wang, S., Shen, Y. (2021). DEM investigation of mixing indices in a ribbon mixer. *Particuology*.
33. Yi, L., Dong, K.J., Zou, R., Yu, A. (2011). Coordination number of the packing of ternary mixtures of spheres: DEM simulations versus measurements. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 50, 8773-8785.
34. Bhalode, P., Ierapetritou, M. (2020). A review of existing mixing indices in solid-based continuous blending operations. *Powder Technology*, 373, 195-209.
35. Radeke, C.A., Glasser, B.J., Khinast, J. (2010). Large-scale powder mixer simulations using massively parallel GPU architectures. *Chemical Engineering Science*, 65, 6435-6442.
36. Liu, P., Yang, R., Yu, A. (2013). DEM study of the transverse mixing of wet particles in rotating drums. *Chemical Engineering Science*, 86, 99-107.
37. Wen, Y., Liu, M., Liu, B., Shao, Y. (2015). Comparative study on the characterization method of particle mixing index using DEM method. *Procedia Engineering*, 102, 1630-1642.

38. Feng, Y.Q., Xu, B., Zhang, S., Yu, A., Zulli, P. (2004). Discrete particle simulation of gas fluidization of particle mixtures. *AIChE Journal*, 50, 1713-1728.
39. Lemieux, M., Bertrand, F., Chaouki, J., Gosselin, P. (2007). Comparative study of the mixing of free-flowing particles in a V-blender and a bin-blender. *Chemical Engineering Science*, 62, 1783-1802.
40. Habchi, C., Ghanem, A., Lemenand, T., Della Valle, D., Peerhossaini, H. (2019). Mixing performance in Split-And-Recombine milli-static mixers—a numerical analysis. *Chemical Engineering Research and Design*, 142, 298-306.
41. Gao, Y., Vanarase, A., Muzzio, F., Ierapetritou, M. (2011). Characterizing continuous powder mixing using residence time distribution. *Chemical Engineering Science*, 66, 417-425.
42. Vanarase, A.U., Muzzio, F.J. (2011). Effect of operating conditions and design parameters in a continuous powder mixer. *Powder Technology*, 208, 26-36.

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

Чисельне моделювання стрічкового змішувача кормів

Додатки

Виконав: магістрант групи МгАІ-2-23
Коломієць Олександр Михайлович

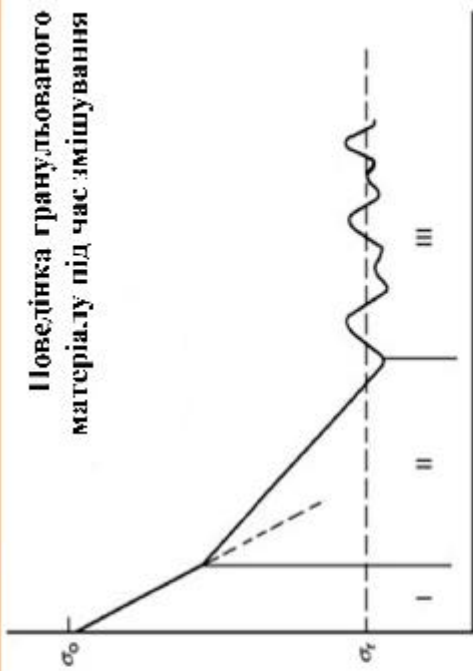
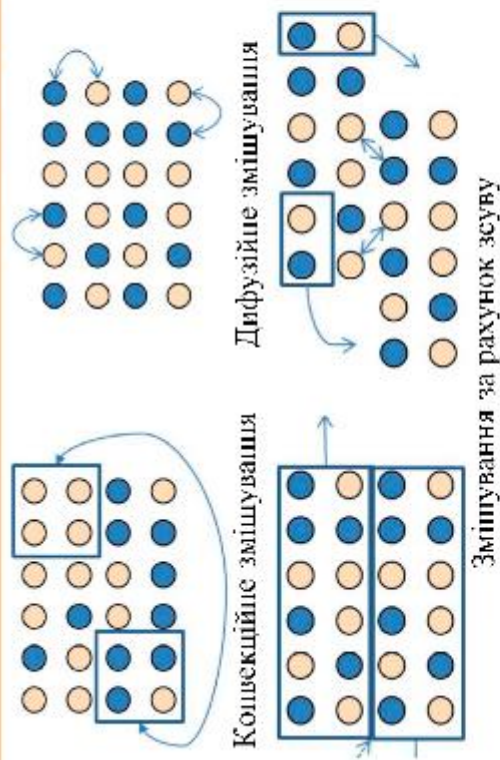
Керівник: д-р техн. наук, страш. дослід.
Алієв Ельчин Бахтияр огли

Дніпро, 2024

Метою цього дослідження є вдосконалення технічного засобу для змішування сипучих компонентів комбікормів шляхом визначення оптимальних параметрів роботи стрічкового робочого органу для підвищення ефективності цього процесу

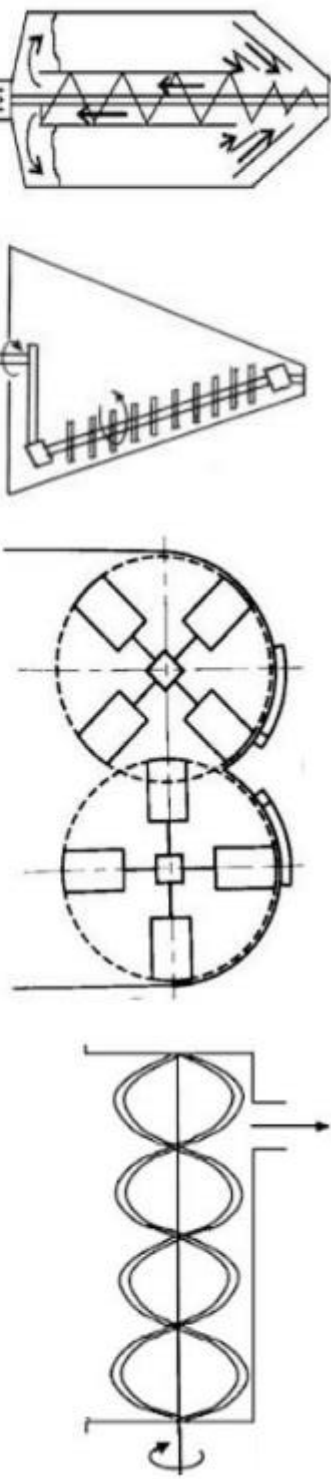
Для досягнення цієї мети передбачається виконати наступні задачі досліджень:

1. Оцінити сучасні технології приготування комбікормів з метою визначення вимог до змішувального обладнання, які забезпечують високу якість змішування.
2. Дослідити фізико-математичні закономірності взаємодії частинок у процесі змішування, використовуючи метод дискретних елементів (DEM), з акцентом на когезивні та несферичні частинки.
3. Розробити методику чисельного моделювання стрічкового змішувача для аналізу впливу конструктивних та технологічних параметрів на процес змішування.
4. Визначити вплив основних факторів на процес змішування (рівень заповнення, швидкість обертання лопаток, густина та розмір частинок) для оптимізації роботи змішувача.
5. Побудувати залежності якості змішування від впливаючих факторів та сформулювати рекомендації щодо оптимізації конструкції і технологічного режиму роботи змішувача.
6. Оцінити економічну ефективність використання вдосконаленого стрічкового змішувача в умовах виробництва комбікормів, зокрема визначити його окупність і переваги порівняно з базовими зразками.



Схематичне зображення характеристичної кривої процесу змішування

Класифікація змішувального обладнання



(a)

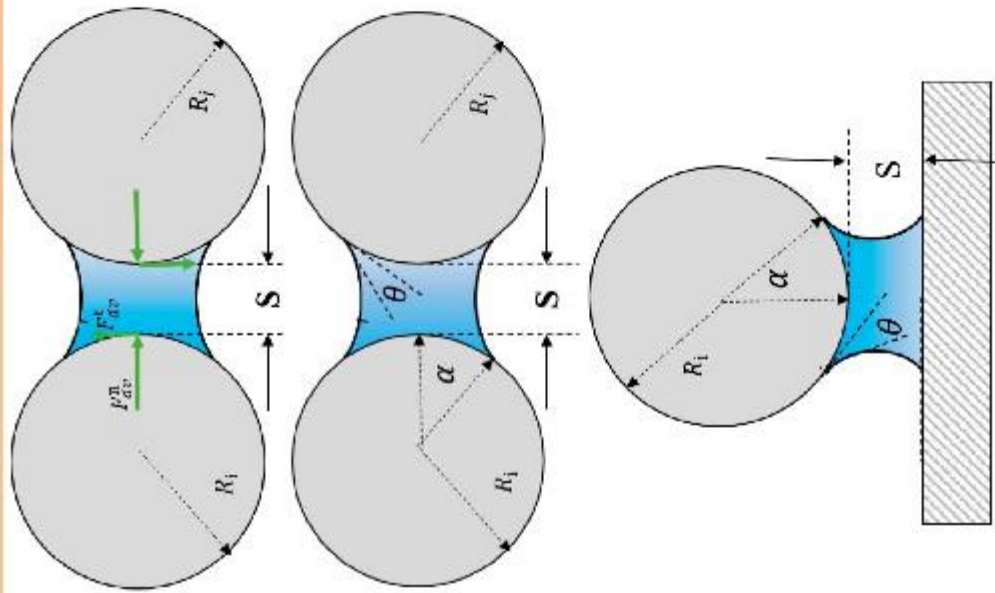
(b)

(c)

(d)

a – стрічковий змішувач; b – лопатевий змішувач; c – орбітальний гвинтовий змішувач; d – вертикальний гвинтовий змішувач

Конвекційні змішувачі



Схематичне зображення капілярної сили моделі рідинного містка: контакт частинка-частинка (а); контакт частинки зі стінкою (b)

Закон збереження імпульсу $m_i \frac{dv_i}{dt} = m_i g + \sum_{j=1}^{k_i} (F_{c,ij} + F_{d,ij} + F_{fb,ij})$

Закон збереження моменту імпульсу $I_i \frac{d\omega_i}{dt} = \sum_{j=1}^{k_i} (T_{ij} + M_{ij})$

де m_i , I_i і g – це маса, момент інерції та прискорення вільного падіння частинки i , відповідно. v_i та ω_i – це трансляційна і обертальна швидкості. k_i представляє кількість частинок, що контактують з частинкою i . F_c – контактна сила, що складається з нормальної і тангенціальної компонент. F_d представляє сили демпфування, які є сумою нормальних і тангенціальних демпфуючих сил у точці контакту з частинкою j . F_{fb} – це сила рідинного мосту. T_{ij} і M_{ij} – це моменти сили та момент тертя ковчання на частинку i , викликані оточуючими частинками.

Нормальна контактна сила $F_{c,ij}^n = \left[\frac{2}{3} \frac{E}{(1-\nu^2)} \sqrt{R} \xi_n^{3/2} - C_n \frac{E}{(1-\nu^2)} \sqrt{R} \sqrt{\xi_n} (v_{ij} \cdot \hat{n}_{ij}) \right] \hat{n}_{ij}$

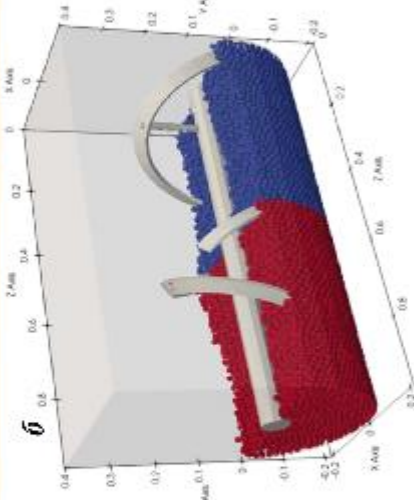
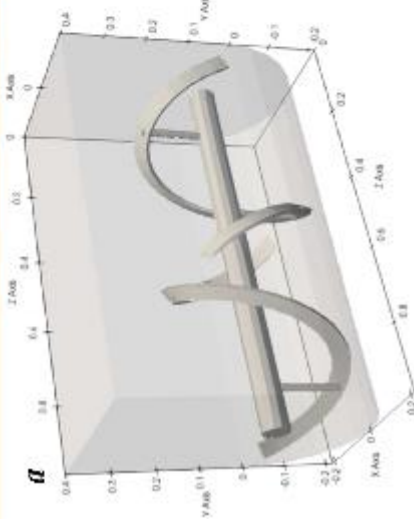
Тангенціальна контактна сила $F_{c,ij}^t = \mu_s |F_{c,ij}^n| \left[1 - (1 - \min(\xi_{sp,ij}^z, \xi_{s,max}^z))^{3/2} \right] \xi_s$

Капілярна сила $F_{sp,ij} = \frac{2\pi R_{sp,ij} \gamma \cos \theta}{1 + 2d_{sp,ij}} - 2\pi \gamma R_{sp,ij} \sin \alpha \sin(\theta + \alpha)$

де γ представляє поверхневий натяг рідини, θ – кут змочування, α – "кут обхвату" – найкоротша відстань між двома сферами

В'язка сила $F_{dv,ij}^t = 6\mu R_{sp,ij} \gamma \nu_T \left(\frac{8}{15} \ln \left(\frac{R_{sp,ij}}{S} \right) \right) + 0.9588$

де μ – в'язкість рідини. ν_T означає відносну нормальну швидкість частинок



Стрічковий змішувач, використаний у поточному дослідженні: (а) конфігурація геометрії; (б) початкова укладка частинок, позначена двома кольорами

$$\text{Число координат} \quad CN = \frac{2N_c}{N_p}$$

де N_c — загальна кількість контактів, а N_p — загальна кількість частинок

$$\text{Індекс Лейсі} \quad M = \frac{\sigma_0^2 - \sigma^2}{\sigma_0^2 - \sigma_1^2}$$

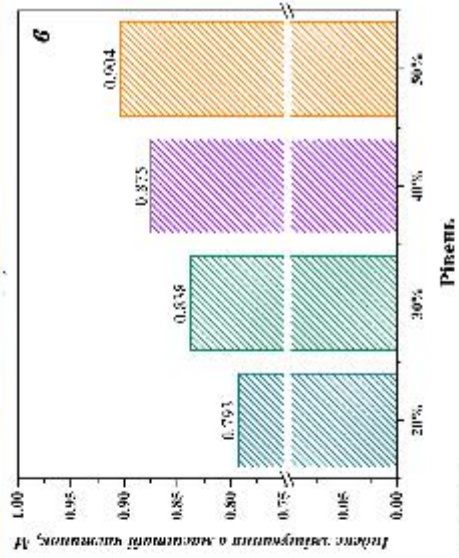
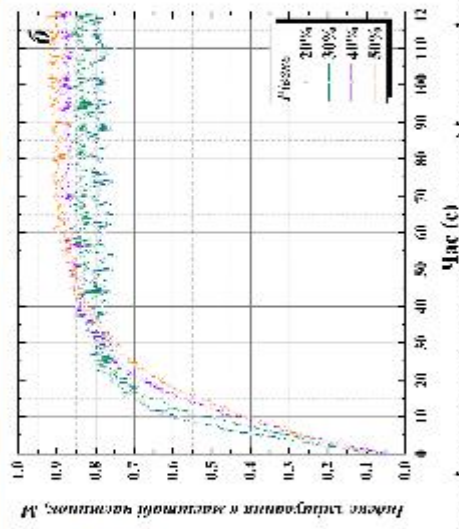
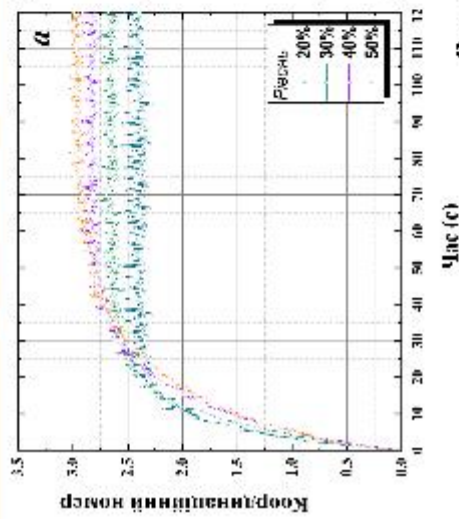
σ — стандартне відхилення між зв'язками,
 σ_0 — стандартне відхиленням у повністю сегрегованому стані до змішування

Параметри симуляції, використані в цьому дослідженні

Параметр	Знач.	Од. вим.
Діаметр посудини, D_v	432	мм
Довжина посудини, L_v	970	мм
Крок лопатки, L_B	484	мм
Кут нахилу лопатки, θ	45, 135	град.
Протяг лопатки, Δ	8.5	мм
Діаметр вала, D_s	31.75	мм
Діаметр частинки, d	15	мм
Щільність частинки, ρ_p	2500	кг/м ³
Модуль Юнга, E_p	1×10^8	Н/м ²
Коефіцієнт Пуассона, ν_p	0.29	-
Коефіцієнти c_n і c_t	0.3	-
Коефіцієнт ковзання, μ_c	0.3	-
Коефіцієнт ковчешня, μ_s	0.002	-

Рівні змінних процесу змішування, що розглядаються

Фактор	Змінна	Од. вим.	Мін.	Макс.	Кодовий шизький	Кодовий високій
A	Рівень заповнення	-	0,1	0,5	-1 ↔ 0,20	+1 ↔ 0,40
B	Швидкість змішувача	об/хв	75	175	-1 ↔ 100	+1 ↔ 150
C	Щільність частинок	кг/м ³	250	3250	-1 ↔ 1000	+1 ↔ 2500
D	Розмір частинок	мм	10	30	-1 ↔ 15	+1 ↔ 25



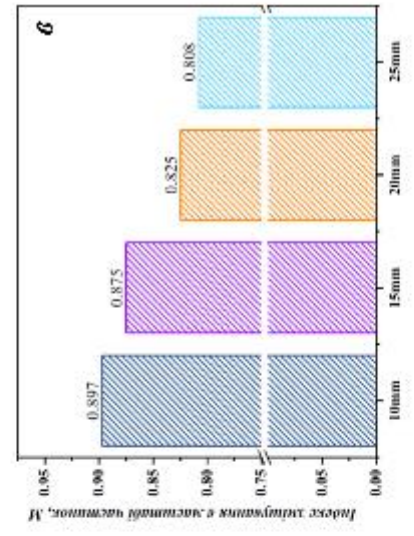
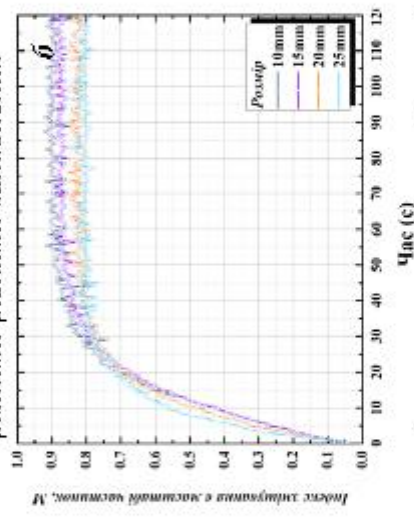
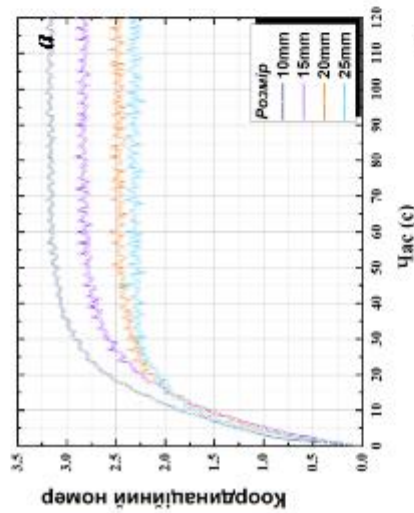
Час (с)

Час (с)

Рівень

Вплив рівня заповнення на поведінку змішування

а – середнє CN між двома типами частинок протягом часу; б – профілі зміни в часі індексів змішування Лейсі стрічкових змішувачів з різними рівнями заповнення; в – усереднені за часом індекси змішування змішувачів з різними рівнями заповнення

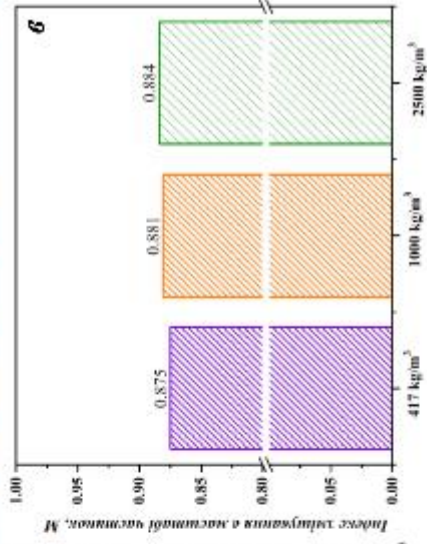
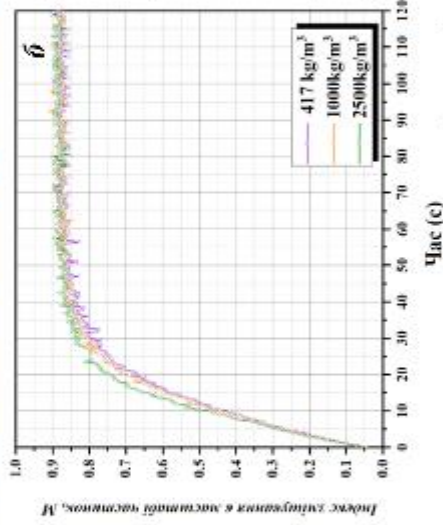
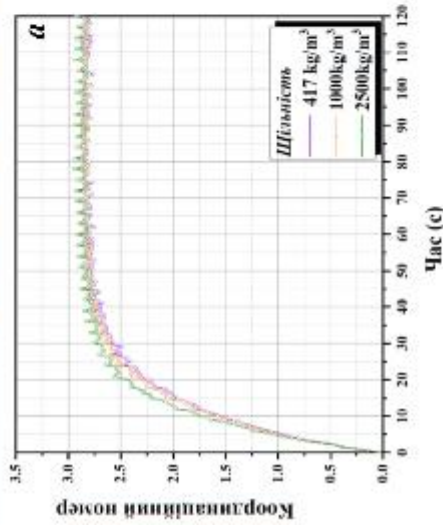


Час (с)

Час (с)

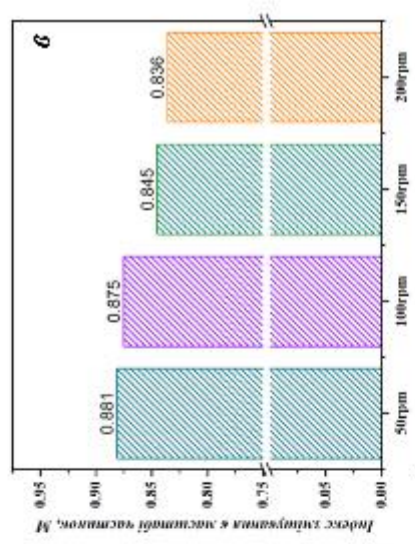
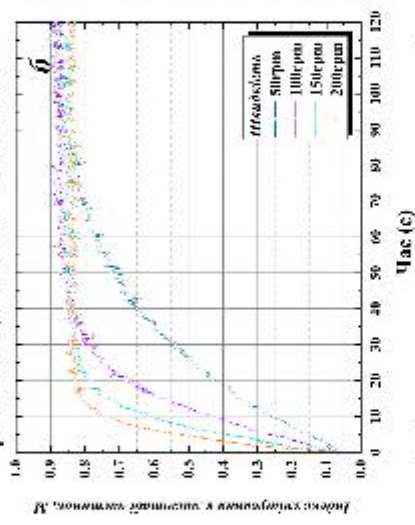
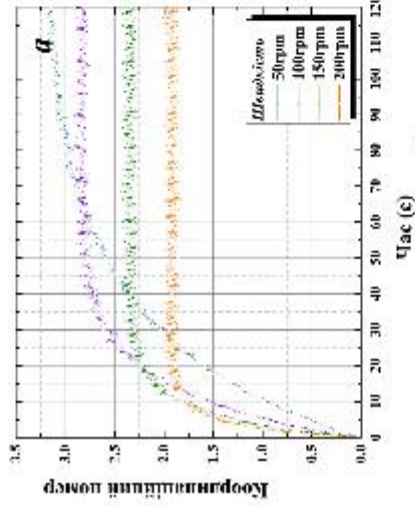
Вплив розміру частинки на поведінку змішування

а – середнє CN між двома типами частинок протягом часу; б – профілі зміни в часі індексів змішування Лейсі стрічкових змішувачів з різними швидкостями обертання; в – усереднені за часом індекси змішування змішувачів з різними швидкостями обертання



Вплив густини частинок на поведінку змішування

а – середнє CN між двома типами частинок протягом часу; б – профілі зміни в часі індексів змішування Лейсі стрічкового змішувачів з різною щільністю частинок; в – усереднені за часом індекси змішування змішувачів з різною щільністю частинок



Вплив швидкості обертання лопаток на поведінку змішування

а – середнє CN між двома типами частинок протягом часу; б – профілі зміни в часі індексів змішування Лейсі стрічкового змішувачів з різними швидкостями обертання; в – усереднені за часом індекси змішування змішувачів з різними швидкостями обертання

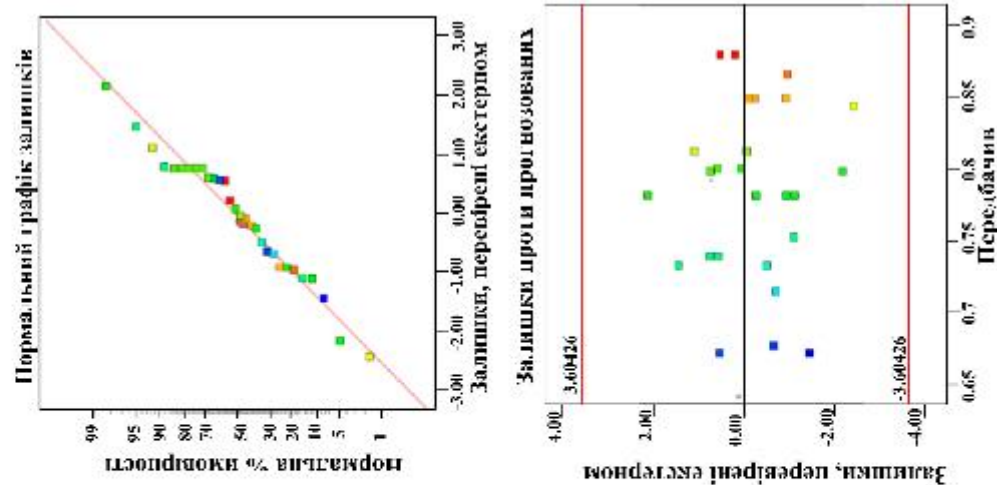
Індекс Лейсі від факторів досліджень

$$\bar{M} = 0.7977 + 0.0473A - 0.0229B - 0.0337D + 0.0076AB - 0.0067A^2 - 0.0042C^2 - 0.0041D^2$$

A – рівень заповнення; B – швидкість змішувача, об/хв; C – пільність частинок, кг/м³; D – розмір частинок, мм

ANOVA для квадратичної моделі

Джерело	Сума квадратів	Кількість ступенів свободи	Середній квадрат	Значення F	P-значення	Значущість
Модель	0,0969	14	0,0069	65,09	< 0,0001	Значуща
A	0,0537	1	0,0537	504,70	< 0,0001	Значуща
B	0,0126	1	0,0126	118,38	< 0,0001	Значуща
C	0,0002	1	0,0002	2,19	0,1598	Не значуща
D	0,0272	1	0,0272	256,03	< 0,0001	Значуща
AB	0,0009	1	0,0009	8,63	0,0102	Значуща
AC	0,0000	1	0,0000	0,28	0,6076	Не значуща
AD	0,0001	1	0,0001	0,62	0,4425	Не значуща
BC	0,0001	1	0,0001	0,59	0,4528	Не значуща
BD	9,68 · 10 ⁻⁰⁶	1	9,68 ⁻⁰⁶	0,09	0,7669	Не значуща
CD	0,0001	1	0,0001	0,95	0,3460	Не значуща
A ²	0,0014	1	0,0014	13,00	0,0026	Значуща
B ²	0,0002	1	0,0002	1,69	0,2133	Не значуща
C ²	0,0006	1	0,0006	5,38	0,0348	Значуща
D ²	0,0005	1	0,0005	5,08	0,0396	Значуща
Резидуальні	0,0016	15	0,0001	-	-	-
F	0,0010	10	0,0001	0,86	0,6072	Не значуща
Шумлик	0,0006	5	0,0001	-	-	-
Кореляція	0,0985	29	-	-	-	-



Параметр	Базовий змішувач (МКУ-1,2)	Удосконалений змішувач	Різниця
Продуктивність, кг/год	280	310	+10,7%
Вартість обладнання, грн	60 000	66 000	6 000
Необхідний час роботи, год/рік	1 071,43	967,74	-103,69
Витрати на оплату праці, грн/рік	128 571,43	116 129,03	-12 442,4
Річна амортизація, грн	9 000	9 900	900
Річний ремонт і обслуговування, грн	6 000	6 600	600
Загальні витрати на амортизацію і ремонт, грн	15 000	16 500	1 500
Енергоспоживання, грн/рік	24 000	21 677,42	-2 322,58
Загальні річні витрати, грн	167 571,43	154 306,45	-13 264,98
Економія, грн/рік	—	—	13 264,98
Додаткові капіталовкладення, грн	—	6 000	6 000
Строк окупності, років	—	0,45	—

1. Зростає інтерес до самостійного виготовлення комбикормів на фермах пояснюється економічною доцільністю та доступністю малосерійних установок, при цьому особлива увага приділяється зниженню енерговитрат і використанню матеріалів без втрати якості продукції, що дозволяє підвищити ефективність виробництва комбикормів.

2. Поведінка частинок у системі змішувача є дуже складною, і механізм змішування частинок у всіх типах змішувачів ще далеко не зрозумілий, що є важливим для масштабування та оптимізації. Розуміння та точний контроль поведінки частинок у процесі змішування частинок є складними завданнями. Тому глибоке розуміння змішування частинок є як левова фундаментом, так і практично важливим для оптимізації відповідних промислових процесів. Зі швидким розвитком високопродуктивних паралельних обчислювальних технологій, метод дискретних елементів (DEM) стає потужним інструментом для вивчення складних гранжеваних систем.

3. Рух частинок у методі дискретних елементів (DEM) визначається законом збереження імпульсу для трансляційного та обертального рухів, з урахуванням контактних сил, демпфуючих сил, а також моментів сил і моментів кочення між частинками. Модель була верифікована експериментальними дослідженнями для забезпечення точності результатів. У дослідженні поведінки когезивних частинок в рамках методу дискретних елементів (DEM) розглядається взаємодія частинок через контактні сили, рідинний міст та сили демпфування. 4. Рівень заповнення, швидкість обертання стрічкового змішувача і розмір частинок мають значний вплив на продуктивність змішування, тоді як густина частинок показує незначний ефект. Зі збільшенням швидкості обертання мішалки і розміру частинок збільшується кількість контактів між різними частинками і кішечний ступінь змішування зменшується, більша частина частинок піддається значним нормальним силам; ймовірність частинок з високими швидкостями і інтенсивність розподілу частинок збільшуються. Крім того, зі збільшенням рівня заповнення збільшується об'ємний потік частинок в радіальному напрямку спостерігається зменшення ймовірності знаходження частинок в нерухомому стані, а коефіцієнт розподілу частинок зростає, що вказує на сильніший об'ємний рух, в абсолютному напрямку більша частка частинок має низьку швидкість, і спостерігається низький коефіцієнт розподілу частинок, що свідчить про слабку ігноривність розподілу. Аналіз множинної регресії вказує на значну роль рівня заповнення, швидкості обертання мішалки і діаметра частинок у впливі на кішечний ступінь моделі і незначну роль густини частинок.

5. Проведено огляд охорони праці та безпеки в надзвичайних ситуаціях. Визначено механічні, електричні і теплові небезпеки шумове навантаження, пилу та аерозольні викиди. Зазначено методи захисту працівників від впливу небезпечних і шкідливих факторів. Вважано правила безпечного виконання роботи при роботі з обладнанням для приготування кормів.

6. Економічне порівняння базового та удосконаленого змішувачів демонструє переваги удосконаленої конструкції. Удосконалений змішувач не лише підвищує продуктивність, але й дозволяє знизити загальні річні витрати за рахунок скорочення часу роботи, економії електроенергії та зниження витрат на оплату праці. Економія при використанні удосконаленого змішувача становить 13264,98 грн. Строк окупності доданих капіталовкладень становить 0,45 року.