

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

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

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

_____ Сидоренко Вячеслав Володимирович

Керівник: _____ Лупко Кристина Олегівна

Рецензент: _____ Луц Павло Михайлович

Дніпро, 2024

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

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

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

ІТС

(назва кафедри)

доцент

(вчене звання)

Дудін В.Ю.

(підпис)

(прізвище, ініціали)

«12» листопада 2024 р.

**ЗАВДАННЯ
НА ДИПЛОМНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ**

Сидоренку Вячеславу Володимировичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи: Чисельне моделювання гвинтового змішувача вологих кормів

керівник роботи Лупко Кристина Олегівна, доктор філософії

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

затверджені наказом вищого навчального закладу від

«12» листопада 2024 року № 3784

2. Строк подання студентом роботи 16.12.2024 року

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

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

1. Стан і напрями досліджень. 2. Аналітичні дослідження процесу змішування компонентів кормів. 3. Методика чисельного моделювання процесу змішування. 4. Результати чисельного моделювання. 5. Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях. 6. Економічна ефективність змішувача вологих 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 Чисельне моделювання (4 аркуша, А4). 5. Економічні показники (1 аркуш, А4). 6. Висновки (1 аркуш, А4)

6. Консультанти розділів роботи

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

7. Дата видачі завдання: 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

_____ (підпис)

Сидоренко В. В.

_____ (прізвище та ініціали)

Керівник роботи

_____ (підпис)

Лупко К. О.

_____ (прізвище та ініціали)

Сидоренко В. В. Чисельне моделювання гвинтового змішувача вологих кормів. Випускна кваліфікаційна робота на здобуття освітнього ступеня «Магістр» за спеціальністю 208 «Агроінженерія». ДДАЕУ, Дніпро, 2024.

У дипломній роботі розглядаються перспективні напрямки використання вологої годівлі тварин, аналізуються засоби для змішування кормів та дослідження процесів змішування в гвинтових конвеєрах. Представлено аналітичні дослідження процесу змішування компонентів кормів, зокрема побудова фізико-математичної моделі для моделювання взаємодії частинок у змішувачі за допомогою методу дискретних елементів (DEM). Описана методика чисельного моделювання, що включає геометрію змішувача, властивості компонентів та їх взаємодії. Отримані результати чисельного моделювання дозволили оцінити вплив різних параметрів взаємодії частинок, коефіцієнта відновлення та геометрії змішувача на якість процесу змішування. Окрему увагу приділено питанням охорони праці та безпеки в надзвичайних ситуаціях. Також оцінена економічна ефективність використання змішувача вологих кормів, що підтверджує доцільність його впровадження. Висновки роботи демонструють, що розроблений підхід до моделювання процесу змішування та аналіз технічних і економічних аспектів сприяє підвищенню ефективності виробництва та зниженню витрат.

Ключові слова: волога годівля, змішувач кормів, гвинтовий конвеєр, метод дискретних елементів (DEM), чисельне моделювання, фізико-математична модель, взаємодія частинок, економічна ефективність, параметри.

Апробація. Сидоренко В. В. (2024). Чисельне моделювання гвинтового змішувача вологих 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, 146–148.

ЗМІСТ

ВСТУП	7
1 СТАН І НАПРЯМИ ДОСЛІДЖЕНЬ	8
1.1 Перспективні напрямки вологої годівлі	8
1.2 Аналіз засобів для змішування кормів	11
1.3 Огляд досліджень змішування у гвинтових конвейерах	14
1.3 Висновки з розділу	18
2 АНАЛІТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ЗМІШУВАННЯ КОМПОНЕНТІВ КОРМІВ.....	20
2.1 Постановка задачі	20
2.2 Фізико-математичний апарат моделювання.....	21
2.3 Формулювання чисельної моделі	29
2.4 Висновки з розділу	32
3 МЕТОДИКА ЧИСЕЛЬНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ЗМІШУВАННЯ ..	33
3.1 Умови та процедура симуляції.....	33
3.2 Геометрія змішувача.....	34
3.3 Частинки компонентів та їх взаємодії	36
3.4 Властивості компонентів кормів.....	39
3.5 Параметри взаємодії компонентів кормів.....	40
3.6 Висновки з розділу	42
4 РЕЗУЛЬТАТИ ЧИСЕЛЬНОГО МОДЕЛЮВАННЯ	43
4.1 Вплив параметрів взаємодії.....	43
4.2 Вплив коефіцієнта відновлення	52
4.3 Вплив геометрії змішувача	59
4.5 Висновки з розділу	64
5 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ	65
6 ЕКОНОМІЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ ЗМІШУВАЧА ВОЛОГИХ КОРМІВ	69
ВИСНОВКИ.....	71
Бібліографія	73
Додатки	78

ВСТУП

Підвищення ефективності сільськогосподарського виробництва безпосередньо пов'язане з продуктивністю тварин, яка, в свою чергу, залежить від раціонального підбору кормів. Для цього використовуються комбіновані корми, премікси, а також білкові, вітамінні та мінеральні добавки. Проте, закупівля готових кормів та сумішей часто супроводжується витратами на транспортування, що може призводити до збитків і підвищення вартості кінцевого продукту. У зв'язку з цим доцільно організувати виробництво комбінованих кормів на місці їх споживання. Це дозволить оптимізувати процеси в аграрному секторі, зокрема в рослинництві та тваринництві, а також врахувати екологічні аспекти та раціональне використання земельних ресурсів.

Один із ключових етапів у приготуванні комбікормів — це змішування, яке забезпечує однорідність кормових сумішей. Зоотехнічно важливо не тільки правильно включити всі компоненти раціону в необхідному співвідношенні, але й забезпечити їх рівномірний розподіл у суміші. Однорідність суміші є гарантією рівномірної поживної цінності корму. Сьогодні виготовлення якісних кормів є важливим завданням для агропідприємств, що вимагає застосування нових і ефективних технологій, зокрема змішувачів. Процес виробництва кормів є складним і вимагає ефективного змішування, що може бути досягнуто за допомогою різних методів, таких як використання обертових лопатей, вібрацій, а також впливу рідини чи стисненого повітря. Проте існуючі рішення не завжди гарантують однорідність на мікрорівні.

Метою цього дослідження є оптимізація технології змішування вологих кормових компонентів шляхом визначення параметрів гвинтового змішувача безперервної дії для покращення ефективності процесу.

У дослідженнях використовуються чисельні методи моделювання в програмному пакеті Simcenter Star-CCM+, статистичний аналіз та експериментальні методи, такі як візуальні спостереження, лабораторні експерименти та порівняння експериментальних даних з теоретичними.

1 СТАН І НАПРЯМИ ДОСЛІДЖЕНЬ

1.1 Перспективні напрямки вологої годівлі

Для годівлі тварин та птиці в українських господарствах використовують різні види кормів: фуражне зерно (кукурудза, ячмінь, горох, соя, пшениця та інші); стеблові корми (сіно, сінаж, солома, силос); коренебульбоплоди та баштанні (буряки, картопля, гарбузи та інші); побічні продукти з цукрової, спиртової та пивоварної промисловості (жом, меляса, барда); різноманітні балансуєчі кормові добавки (білкові, мінеральні, вітамінні).

Відповідно до типу тварин, їх виробничого призначення та запланованої продуктивності формуються раціони з цих кормів. Корм можуть згодовувати як у натуральному вигляді з обмеженою кількістю компонентів, так і в складі кормосумішей.

Кормосуміші можуть мати різну вологість і поділяються на: сухі комбікорми (вологість до 20 %), зволожені (20-40 %), вологі (40-60 %), напіврідкі (60-80 %) і рідкі (понад 80 %).

Фуражне зерно зазвичай включається до складу сухих комбінованих кормів, які готуються за певними рецептами.

Зволожені кормосуміші використовуються, коли консервоване зерно кукурудзи або плющене зерно вводяться в раціон великої рогатої худоби та свиней разом із добавками. Також можуть бути мішанки з концентрованих кормів і подрібнених коренеплодів або зелені для качок, гусей тощо.

Напіврідкі кормосуміші зазвичай складаються з 25-30 % комбікормів, 8-11 % трав'яного або вітамінно-сінного борошна, а решта – коренеплоди.

Вологі кормосуміші для великої рогатої худоби та свиней, а також зволожені суміші для тварин і птиці мають бути свіжоприготовленими та без

неприємного запаху. Суміші, які містять подрібнені коренеплоди, потрібно роздавати не пізніше ніж через 1,5-2 години після приготування.

Рідкі кормосуміші являють собою розчин комбікормів у воді в пропорції 1:3 і можуть включати різноманітні пійла, у тому числі замітники молока.

Основні вимоги до приготування кормосумішей: свіжість приготування; відсутність неприємного запаху; додавання подрібнених стеблових кормів згідно зоотехнічних норм до вологих сумішей; подрібнення кормів до оптимальних розмірів для кожного виду тварин та птиці.

Для організації повноцінної годівлі тварин пропонуються такі підходи:

- у схемах вигодовування телят і поросят варто повністю відмовитися від відвійок і частково замінити незбиране молоко бобовими продуктами;
- в комбікормах рослинні білкові компоненти (соєва та соняшникова макуха й шроти) можуть бути частково або повністю замінені бобовими сумішами;
- дорогі комбікорми в раціонах тварин можна замінити бобово-злаковими сумішами;
- на основі бобових і бобово-злакових сумішей, з додаванням інших джерел білка, жиру та вітамінно-мінерального комплексу, можна готувати рідкі замітники незбираного молока та вологі комбікорми-концентрати.

Розроблені програми для збалансованої годівлі тварин з використанням бобових і бобово-злакових сумішей, включаючи сою, горох, люпин, ячмінь та кукурудзу. Такі суміші можна приготувати безпосередньо на фермах з використанням обладнання, забезпечуючи тварин рослинним «молоком» і бобовими мішанками.

Ця технологія передбачає виготовлення концентрованих бобових або злаково-бобових добавок у вигляді пастоподібних продуктів, в яких зберігаються всі вітаміни та мінерали, на відміну від соєвого шроту та макухи.

Основні положення технології включають:

- у схемах вигодовування телят і поросят слід виключити молочні продукти і частково замінити цільне молоко бобово-злаковими сумішами;
- в комбікормах рослинні білкові компоненти або корми тваринного походження можуть бути замінені бобовими мішанками;
- дорогі комбікорми можна замінити на бобово-злакові мішанки;
- на основі бобових і бобово-злакових вологих сумішей можна готувати рідкі замітники незбираного молока і вологі комбікорми-концентрати.

Вологі мішанки можна використовувати як при сухому типі годівлі (зволоження сухих кормів), так і при організації вологого типу годівлі.

Враховуючи різноманітність технологічних підходів і асортимент кормів, фермери можуть підбирати оптимальний набір кормів, враховуючи їх базу.

Можливі напрями використання технології:

1. Приготування вологих заміників молочних продуктів, що є перспективним, особливо для новонароджених телят, поросят і ягнят. Головна перевага полягає в тому, що вологі замітники можна готувати на фермах без використання заводських сухих форм.

Складнощі з існуючими сухими заміниками обумовлені технологією їх виробництва та необхідністю спеціалізованого обладнання, що робить їх дорогими. Технологічний процес від виготовлення до випоювання тваринам є енергоємним і трудомістким.

2. Приготування вологих зернових сумішей. Сучасні технології рекомендують термічну обробку всіх бобових культур і певних інших, що містять антипоживні речовини.

Можна виготовляти бобово-злакові вологі кормові мішанки та збалансовані комбікорми-концентрати для різних видів тварин.

З точки зору використання готових кормів, пропонуються такі способи: додаткове вигодовування вологих мішанок з ємностей; зволоження сухих комбікормів мішанками для зменшення вмісту білкових компонентів; зволоження

сумішей грубих, зелених, соковитих кормів вологими мішанками для підвищення їх поживної цінності.

Важливо звернути увагу на особливості технології при підборі компонентів, включаючи термічну обробку та використання важкоперетравлюваних рослинних кормів. Склад компонентів для заміників молочних продуктів або вологих кормових сумішей визначається залежно від їх поживної цінності та типу тварин. Найскладніші суміші розробляються для новонароджених, тоді як для дорослих тварин можна використовувати прості бобові або бобово-злакові мішанки.

1.2 Аналіз засобів для змішування кормів

На сьогоднішній день представлено безліч моделей змішувачів, які виготовляються як промисловими компаніями, так і індивідуальними дизайнерами, розробленими науково-дослідними установами та конструкторськими бюро. Ці пристрої створені фахівцями та раціоналізаторами різних підприємств. Наявність великої кількості конструктивних варіантів, зокрема, захищених патентами та авторськими свідоцтвами, свідчить про їхню різноманітність.

Одним із ключових завдань при створенні нових змішувачів є зменшення питомих енерговитрат у процесі змішування, зберігаючи при цьому технічні вимоги до готової суміші. Оптимізація робочих елементів змішувача та вдосконалення режимів їх функціонування є важливими шляхами досягнення цих цілей.

Було проведено дослідження існуючих моделей для виявлення найбільш перспективних конструкцій змішувачів. На основі вже відомих класифікацій кормових змішувачів розроблено більш детальну класифікацію, зосереджену на типах робочих органів.



Рисунок 1.1 – Класифікація засобів для змішування кормів

Змішувачі поділяються за кількома критеріями. В залежності від призначення, вони можуть бути призначені для перемішування сухих, рідких, напіврідких та пастоподібних продуктів, а також для універсального використання.

Згідно з методом змішування, змішувачі поділяються на дві основні категорії: безперервної та періодичної дії. Змішувачі безперервної дії доцільні для великих обсягів виробництва, проте їх використання в аграрному секторі обмежене через труднощі з точним дозуванням сипучих матеріалів у визначених пропорціях. Незважаючи на це, вони мають кілька переваг у порівнянні зі змішувачами періодичної дії: висока продуктивність, можливість повної автоматизації процесу виготовлення суміші, інтеграція в технологічні лінії без додаткових ємностей, а також зменшення витрат на енергію та матеріали. Якість

змішування в змішувачах безперервної дії залежить від рівномірності подачі інгредієнтів, їх ступеня подрібнення та тривалості дії робочого елемента на суміш.

Змішувачі періодичної дії є популярними в сільському господарстві для виготовлення комбікормів і кормових сумішей, особливо на малих комбікормових установках. Вони можуть бути як стаціонарними, так і мобільними. Однією з основних технологічних переваг є можливість дозування за вагою, що дозволяє досягати мінімальних відхилень у складі інгредієнтів та автоматизувати процес приготування за конкретною рецептурою. У таких змішувачах також можна змінювати технологічні налаштування і додавати добавки в різному порядку.

Що стосується конструкції, змішувачі можуть мати стаціонарний або рухомий бункер. Змішувачі з обертовим бункером не потребують додаткових робочих елементів і відзначаються високою щільністю конструкції, оскільки бункер виготовляється без технологічних отворів для валів. Це спрощує конструкцію, але вимагає використання підшипників підвищеної вантажопідйомності, що може підвищити витрати. Такі змішувачі, як правило, мають низьку продуктивність через знижені значення коефіцієнта заповнення, пов'язані з особливостями процесу змішування. Відсутність захисного кожуха на обертовому бункері може створити небезпеку для працівників. У комбікормовій промисловості найпоширенішими є змішувачі з нерухомим бункером.

Змішувачі можуть мати від одного до чотирьох валів із робочими елементами. Одновальні горизонтальні змішувачі, зазвичай, працюють в безперервному режимі, що забезпечує високу продуктивність, але може призводити до низької якості змішування та громіздкості конструкції.

Переваги гвинтового змішувача

1. Ефективність змішування: гвинтові змішувачі забезпечують однорідність суміші завдяки безперервному руху робочого органу, що сприяє рівномірному розподілу компонентів.

2. Мінімальні механічні втрати: конструкція гвинтового змішувача дозволяє зменшити втрати матеріалів завдяки прямому контакту між компонентами під час змішування.

3. Адаптивність до вологих компонентів: гвинтові змішувачі добре справляються з вологими інгредієнтами, оскільки забезпечують необхідний тиск і розподіл, що запобігає злипанню і утворенню грудок.

4. Висока продуктивність: завдяки безперервному процесу змішування, гвинтові змішувачі здатні обробляти великі обсяги кормів за короткий час.

5. Енергоефективність: використання гвинтових механізмів знижує енергетичні витрати на змішування порівняно з іншими типами змішувачів.

6. Простота обслуговування: гвинтові змішувачі зазвичай мають просту конструкцію, що полегшує їх обслуговування та ремонт.

7. Універсальність: ці змішувачі можуть використовуватися для змішування різних видів компонентів, включаючи рідкі, пастоподібні та вологі інгредієнти.

Тому гвинтовий змішувач є оптимальним вибором для змішування вологих компонентів кормів завдяки своїм унікальним перевагам. Він забезпечує високу якість змішування, ефективно обробляє різноманітні інгредієнти і знижує ризик утворення грудок, що робить його найкращим варіантом для виробництв, що працюють з вологими кормами.

1.3 Огляд досліджень змішування у гвинтових конвейерах

Змішувальна поведінка будь-яких продуктів визначається комбінацією конструкції змішувача (розміри), змішуваних продуктів (властивості матеріалів) та умов змішування (обертний момент, заповненість, порядок подачі тощо). У літературі є кілька досліджень, присвячених аналізу змішування гранульованих потоків у промисловому обладнанні в залежності від цих параметрів. Хоча більшість досліджень змішування — як чисельних, так і експериментальних —

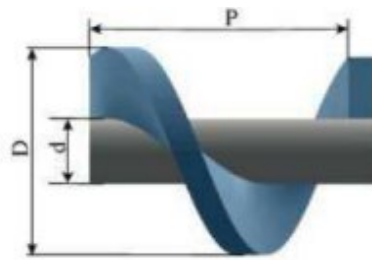
проводяться для партійних змішувачів, безперервні змішувачі, зокрема гвинтові змішувачі, аналізувалися в меншій мірі. Далі наведено короткий підсумок результатів літератури щодо відповідних параметрів при безперервному змішуванні гранул.

Аналіз впливу властивостей матеріалів. Cleary та ін. і Yu та ін. досліджували потік некогезивних і когезивних частинок з бункера у гвинтовий конвейер відповідно. У обох дослідженнях було виявлено, що тертя є важливим фактором у поведінці частинок під час їх подачі та потоку. У другому дослідженні також було показано, що наявність когезивних сил у матеріалі значно змінює поведінку потоку. Спостерігаються різні стани потоку в залежності від збільшення когезії: для некогезивних частинок відбувається безперервний потік частинок з бункера у корпус гвинта. При збільшенні когезивної сили до певного значення потік стає переривчастим, оскільки частинкам важко заповнити порожнечі, створені гвинтом. При дуже високій когезії матеріал стає твердим і сильно опирається змінам, викликаним лопаткою гвинта. Orefice і Khinast спостерігали вплив тертя між частинками та конвеєром у системі сухих частинок. Вони виявили, що обсяг потоку є обернено пропорційним відносному коефіцієнту тертя. Як тільки коефіцієнт тертя збільшується, відносна тангенціальна швидкість частинок щодо поверхні гвинта наближається до нуля. Rezo та ін. також досліджували потік сухих частинок у гвинтовому конвеєрі; однак автори зазначають, що швидкості частинок (як осьові, так і тангенціальні компоненти) не залежать від змін тертя між частинками та стінкою, не підкріплюючи своє твердження.

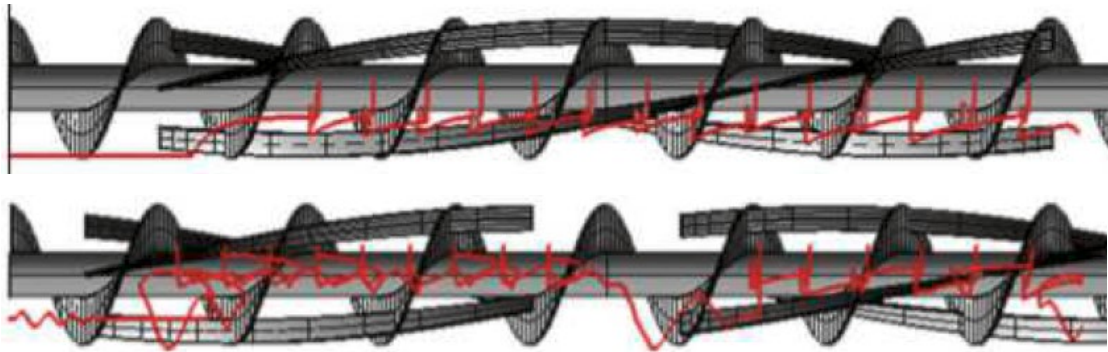
Аналіз впливу конструкції обладнання. Tsai та Lin провели експерименти з використанням гвинтового живильника для різних розмірів і форм гвинта. Загалом, найважливішими розмірами гвинта є діаметр гвинта D , діаметр нарізки d і крок P . Автори виявили, що збільшення діаметра гвинта, діаметра польоту, товщини польоту або зменшення кроку можуть підвищити ступінь змішування

гвинтового живильника. З іншого боку, ступінь змішування зменшується при нижчих значеннях d . Tanida та ін. досліджували транспортування та змішування некогезивних частинок у гвинтовому живильнику для різних конструкцій гвинта, в яких змінювався коефіцієнт кроку P до діаметра гвинта D . Для малих значень P/D швидкість потоку пропорційна цьому відношенню та зменшується, оскільки відношення стає більшим. Швидкість змішування швидко зростає зі збільшенням P/D у малих діапазонах цього відношення. Rezo та ін. змінили конструкцію лопатки однопольного гвинтового конвеєра, вставивши додаткові спіралеподібні або гвинтові смуги на периферії гвинта в тому ж або протилежному напрямку потоку матеріалу. Було зроблено висновок, що шлях транспортування сухих частинок у змішувачі може бути суттєво подовжено за рахунок додавання цих елементів. Хоча час утримання залишається постійним, швидкості частинок зростають суттєво. Траєкторії частинок-контурів показані для різних конструкцій лопатки гвинтового конвеєра. Симуляції показують, що шлях частинок є майже прямою лінією у початковому випадку, що є типовою конструкцією для гвинтових конвеєрів. Траєкторії частинок стають більш складними для модифікованих конструкцій, що збільшує ймовірність змішування частинок під час транспортування.

Аналіз впливу експлуатаційних умов. Найбільш вивченими експлуатаційними умовами є швидкість обертання валу та заповненість частинок у жолобі. Shi та ін. моделювали контактні сили між сухими частинками у гвинтовому конвеєрі для різних швидкостей обертання. Їхні результати симуляції показують, що середні нормальні сили є впливовішими за середні тангенціальні сили в один і той же момент часу. Також середня контактна сила виявляється найвищою при найнижчій швидкості обертання в їхньому дослідженні. На думку авторів, це пов'язано з тим, що середнє перекриття частинок є найвищим при найнижчій швидкості обертання.



(a)



(б)

Рисунок 1.2 – (а) Відповідні розміри основного змішувального елемента гвинтового конвеєра з діаметром польоту D , кроком P та діаметром вала d ; (б) Траєкторія частинки-контурів для різних конструкцій змішувального елемента

Натомість Wang та ін. зазначають, що швидкість обертання підвищує осьову швидкість частинок, масовий потік та контактні сили між сухими частинками, тоді як осьова швидкість частинок зменшується з рівнем заповнення. Жоден з двох авторів не вивчав ефективність змішування. Heindel та ін. досліджували вплив швидкості обертання гвинта на індекс змішування для сухої багатоконпонентної суміші в подвійному гвинтовому змішувачі. Було зроблено висновок, що швидкість обертання гвинта має незначний вплив на ступінь змішування за фіксованої заповненості та фіксованої геометрії гвинта.

У згаданому раніше дослідженні Tanida та ін. щодо змішування некогезивних частинок у гвинтовому подавачі автори також зосереджуються на впливі заповнювальної частки. Вони стверджують, що змішування частинок у гвинтовому конвеєрі активується поперечним рухом над центральним валом. Цей

рух стає обмеженим, коли заповнювальна частка перевищує значення 0,5. Було виявлено, що як коефіцієнт змішування, так і швидкість транспорту зменшуються при високих рівнях заповнення.

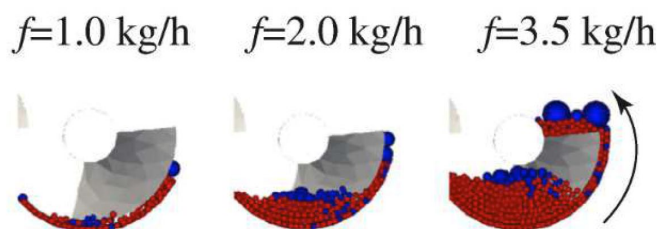


Рисунок 1.3 – Ілюстрація впливу швидкості подачі на рівень заповнення відносно вала

Отже, описані дослідження продемонстрували використання методу дискретних елементів (DEM) для полегшення (пере)проектування гвинтів, аналізуючи рухи та взаємодії частинок. Хоча DEM виявив великий потенціал у аналізі змішування гранул, більшість попередніх досліджень обмежуються монодисперсними, односкладовими та сухими системами частинок. Також лише обмежена кількість досліджень включила аспект кількісної оцінки змішування в системах гвинтових конвеєрів/змішувачів.

1.3 Висновки з розділу

1. Перспективні напрямки вологої годівлі тварин в українських господарствах базуються на різноманітних кормах, включаючи фуражне зерно, стеблові корми, коренебульбоплоди та побічні продукти промисловості. Важливими аспектами є використання кормосумішей з різними рівнями вологості, їх свіжість та відсутність неприємного запаху. Застосування бобово-злакових сумішей може значно підвищити ефективність годівлі, зменшуючи витрати на дорогі комбікорми та забезпечуючи тварин збалансованим харчуванням. Використання вологих заміників молока, термічна обробка бобових культур та

збалансовані комбікорми-концентрати є ключовими технологіями, що дозволяють фермерам адаптувати раціони до потреб різних видів тварин, зокрема новонароджених телят і поросят.

2. Аналіз засобів для змішування кормів демонструє широкий спектр моделей змішувачів, розроблених як промисловими компаніями, так і науково-дослідними установами. Основними критеріями класифікації є призначення, метод змішування та конструкційні особливості. Гвинтові змішувачі вирізняються своїми перевагами, такими як висока ефективність змішування, мінімальні механічні втрати, адаптивність до вологих компонентів, енергоефективність та простота обслуговування. Вони є оптимальним вибором для змішування вологих кормів, забезпечуючи високу якість готової суміші, що робить їх ідеальними для виробництв, що працюють із різноманітними інгредієнтами.

3. Огляд досліджень змішування у гвинтових конвейерах підтверджує, що ефективність змішування залежить від поєднання конструкційних параметрів, властивостей матеріалів та умов експлуатації. Аналіз показав важливість тертя, розмірів гвинта та швидкості обертання в процесі змішування. Виявлено, що підвищення когезії матеріалів може негативно вплинути на потік, тоді як оптимальні умови заповнення (близько 0,5) сприяють кращій якості змішування. Метод дискретних елементів (DEM) виявив великий потенціал для вдосконалення проєктування гвинтових змішувачів, хоча більшість досліджень зосереджені на простих системах. Таким чином, подальші дослідження у цій галузі повинні включати більш різноманітні матеріали та комплексні системи для більш точної оцінки ефективності змішування.

2 АНАЛІТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ЗМІШУВАННЯ КОМПОНЕНТІВ КОРМІВ

2.1 Постановка задачі

Під час змішування частинки взаємодіють одна з одною та зі стінками обладнання, що дозволяє їм переміщатися від входу до виходу обладнання. Тип взаємодії між частинками при контакті загалом залежить від їх вологовмісту на момент контакту. Можливо три типи міжчасткових взаємодій:

1. *Контакт між сухими частинками.* Коли частинка контактує з сусіднім об'єктом (іншою частинкою або стінкою), на місці контакту виникають контактні сили та моменти. Ці сили є відштовхувальними та дисипативними за своєю природою, що призводить до відскоку частинок після удару (зміни напрямку руху) з супутніми втратами енергії.

2. *Контакт між вологими частинками.* Коли вологі тверді частинки стикаються, на місці контакту утворюються відштовхувальні контактні сили та моменти, а об'єм рідини частинок передається у вигляді рідкого мосту, який з'єднує частинки. Рідкі мости створюють притягувальні сили між частинками, що змушує їх чинити опір гравітаційним і зсувним силам, які намагаються розірвати їх. Коли частинки збуджені, вони починають віддалятися одна від одної, і відстань між поверхнями частинок збільшується, що робить рідкий міст тоншим. Величина адгезійної сили зменшується зі збільшенням відстані між частинками. На деякій критичній відстані розриву рідкий міст розривається в найтоншому місці, і рідина з кожної половини розірваного мосту залишається на окремих частинках.

3. *Контакт між сухими і вологими частинками.* У цьому випадку рідина, що зберігається в тонкому шарі вологої частинки, частково поглинається сухою частинкою, утворюючи нову вологу частинку. Певний об'єм рідини (V_{Lmin}) залишається в пастці та закріплюється в частинках після того, як вони стають

вологими. Тому вологовміст частинки повинен бути більшим або рівним V_{Lmin} для передачі рідини іншим частинкам.

Є чітка необхідність у створенні розширеної моделі, яка могла б прогнозувати розподіл твердих зерен і рідин у змішувачі для різних геометрій, коли матеріал переміщується від входу до виходу. Оскільки суміш змінюється від сухого гранульованого матеріалу на початку сухого змішування до суспензії в кінці мокрого змішування, повна модель повинна в кінцевому підсумку бути здатною моделювати весь діапазон рівнів насичення від сухого стану до повністю насиченого. Враховуючи наявний час для поточного дослідження, обсяг моделі обмежується сухим змішувальним блоком, де припускається, що вміст рідини настільки низький, що суміш залишається в режимі плівкового змішування. Отже, метою моделі в цьому дослідженні є оцінка ступеня змішування.

Основна ідея полягає в розробці моделі DEM (методу дискретних елементів), яка враховує взаємодії частинка-частинка та частинка-стіна залежно від стану вологості частинок. Це включає, з одного боку, застосування відповідної контактної моделі, а з іншого – реалізацію передачі рідини між об'єктами, що контактують, на кожному часовому кроці. На цьому етапі єдині адгезійні сили, які враховуються, – це сили через рідкі мости (капілярна адгезія). Для виконання симуляцій використовується програмний пакет Star-CCM+ із спеціальним типом частинок, так званими "частинками з рідкою плівкою", що дозволяє користувачеві призначати рідину сферичним частинкам. Star-CCM+ наразі пропонує широкий вибір контактних моделей і модель міграції рідини, які можна комбінувати для опису явищ, що відбуваються в системі.

2.2 Фізико-математичний апарат моделювання

Сили, які діють на компоненти кормів, можуть виникати через короткодіючі взаємодії (зіткнення між частинками або частинками та стінками), об'ємні сили та

довгодіючі взаємодії. У вологому гранульованому матеріалі присутні всі ці взаємодії. Хоча об'ємні сили та моменти легко визначаються за допомогою відомих законів фізики, обчислення сил і моментів короткодіючих і довгодіючих взаємодій вимагає ретельного розгляду явищ взаємодії частинка-частинка та частинка-стіна. Моделі, застосовні до цього дослідження, наведено нижче.

Об'ємна сила на кожен частинку i — це сила тяжіння:

$$F_i^b = m_i g \quad (2.1)$$

де

$$m_i = V_i \rho_i = \left(\frac{4}{3} \pi a_i^3 \right) \rho_i \quad (2.2)$$

Нормальні сили завжди враховуються при описі контактів, оскільки частинки «пролітали б» одна через іншу, якби вони не були активними. Для тангенціальних ступенів свободи розглядаються три різні закони взаємодії: 1) тертя (опір ковзанню), 2) опір обертанню та 3) опір крученню. Є різні моделі для обчислення контактних сил для цих взаємодій, найпростішою з яких є модель лінійної пружини з демпфером (LSD). Загалом, сила є комбінацією двох основних компонентів: лінійної пружної відштовхувальної сили (k_{ij}), через яку частинки відштовхуються одна від одної, та лінійної дисипативної сили, яка діє в напрямку, протилежному їх відносній швидкості (γv_{ij}) під час контакту частинок, що дозволяє розсіювати енергію. Ці взаємодії визначаються на основі нормальної, ковзної, обертальної та крутної швидкостей і всі вони слідуєть подібній процедурі обчислення сили, як показано на рисунку 2.1. Для тангенціальних ступенів свободи сили використовуються для обчислення моментів. На відміну від тангенціальної сили, обертальні та крутні сили насправді не присутні, але просто полегшують обчислення моментів.

Кожна з трьох тангенціальних сил/моментів також обмежується критерієм текучості. У випадку тангенціальної сили (рисунок 2.2), поверхневий контакт зсувається, і частинки ковзають одна по одній, коли співвідношення

тангенціальної та нормальної сили перевищує коефіцієнт статичного ковзного тертя μ^{ss} . Тангенціальна сила зменшується, поки співвідношення не стане меншим або рівним коефіцієнту динамічного ковзного тертя μ^s . Та ж аналогія застосовується до сил обертання та кручення. Хоча статичний коефіцієнт тертя, як правило, більший за динамічний коефіцієнт, часто припускають єдиний коефіцієнт тертя, тобто $\mu^{ss} = \mu^s$. Подібно, сили обертання (і кручення) обмежені коефіцієнтами тертя обертання та кручення відповідно.

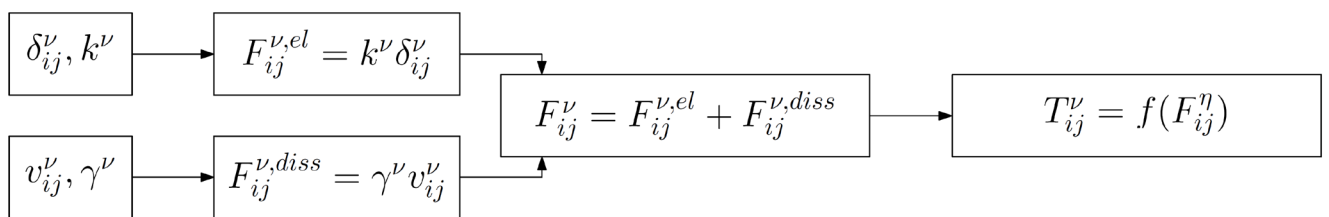


Рисунок 2.1 – Підпрограма для обчислення контактних сил взаємодії та моментів із відповідних вхідних параметрів

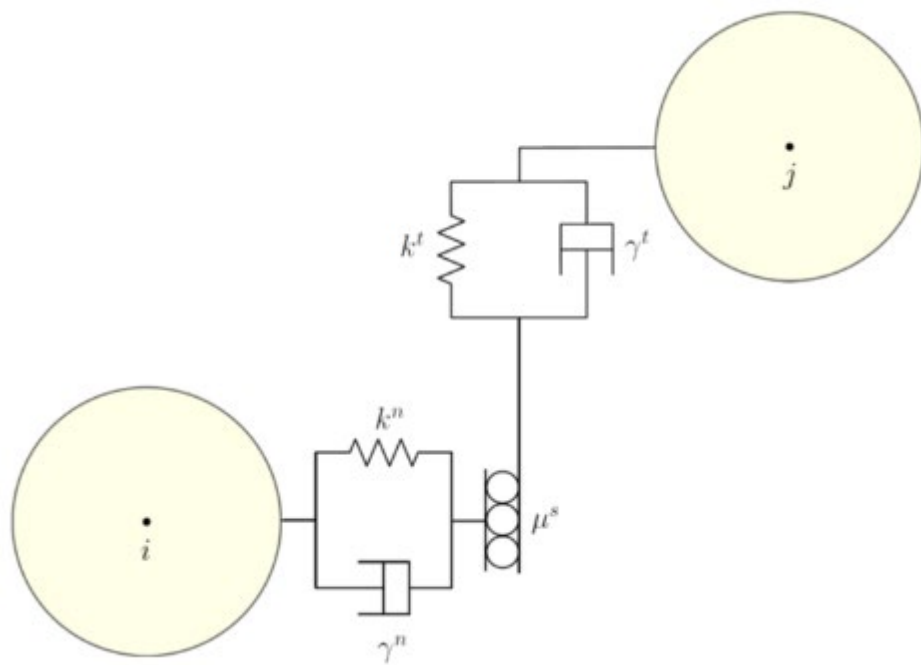


Рисунок 2.2 – Приклад двох частинок, i та j , які можуть взаємодіяти за допомогою моделі LSD із ковзним тертям

Як уже згадувалося, при наявності рідини між частинками утворюються рідинні мости. Коли міст утворюється, когезійна (капілярна) сила F^{cp} діє в нормальному напрямку. Ця сила залишається активною навіть після розділення частинок до досягнення критичної відстані S_{crit} , при якій рідинний міст руйнується (рисунок 2.3).

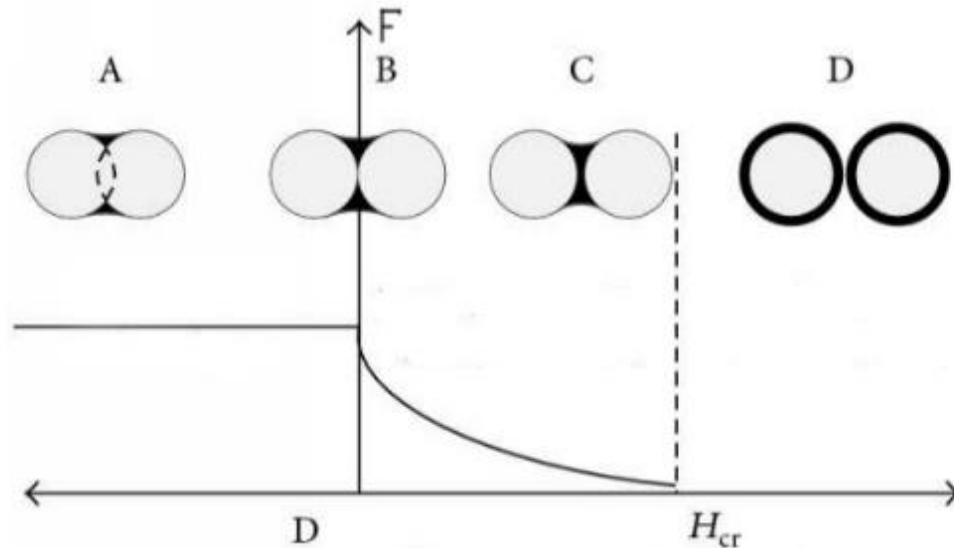


Рисунок 2.3 – Ілюстрація утворення та руйнування рідинного мосту залежно від відстані між двома вологими частинками

Якщо дві сферичні частинки з'єднані рідинним мостом, як показано на рисунку 2.4, капілярна сила, що діє на кожну частинку, зумовлена: 1) поверхневим натягом на лінії контакту рідина-газ-тверде тіло та 2) різницею гідростатичного тиску на межі рідина-газ, що виникає через кривизну межі. Декілька авторів вивели рівняння для капілярної сили з урахуванням цих факторів; гарний огляд наведено у Віллета та ін. Для стислості розглянемо лише кінцевий вираз для $F^{cp,n}_{ij}$, запропонований Віллетом та ін., як функцію специфікацій частинок, властивостей рідини та вологості системи.

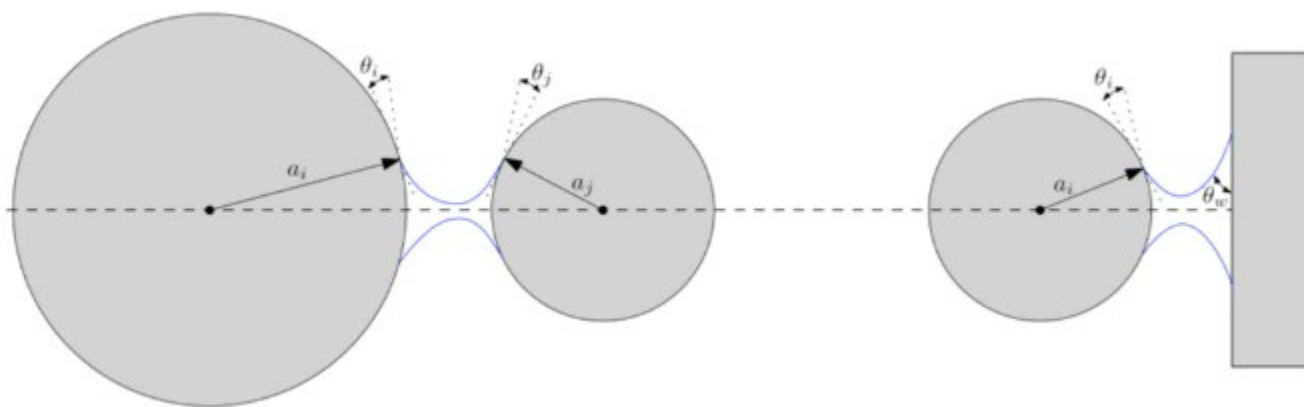


Рисунок 2.4 – Ілюстрація рідинного мосту між двома частинками (зліва) і частинкою та стінкою (справа)

У підсумку, як контактні сили, так і когезійні сили рідинного мосту враховуються для частинок, що контактують. Якщо рідинний міст утворюється між частинками, які не контактують, враховується лише сила рідинного мосту. Схема розрахунку представлена на рисунку 2.5.

Перша модель дисперсії рідини використовувалася в методі дискретних елементів (DEM), у ній рідина перерозподіляється під час контакту між частинками. У цій моделі передбачається, що рідина завжди рівномірно розподілена на поверхні окремих частинок, що означає, що рідина, яка перерозподіляється після розриву рідинного мосту, миттєво поширюється по всій поверхні частинки.

Кількість рідини, доступної для утворення рідинного мосту між двома частинками i і j , залежить від їхнього вмісту вологи, V_L^i і V_L^j , відповідно. Певна кількість рідини V_L^{\min} залишається всередині кожної частинки, і об'єм рідини частинки має бути більшим за V_L^{\min} , щоб сприяти утворенню рідинного мосту. Таким чином, при визначенні доступної рідини для утворення мосту ("дистрибутивного" об'єму рідини) можливі три сценарії, як показано в таблиці 2.1.

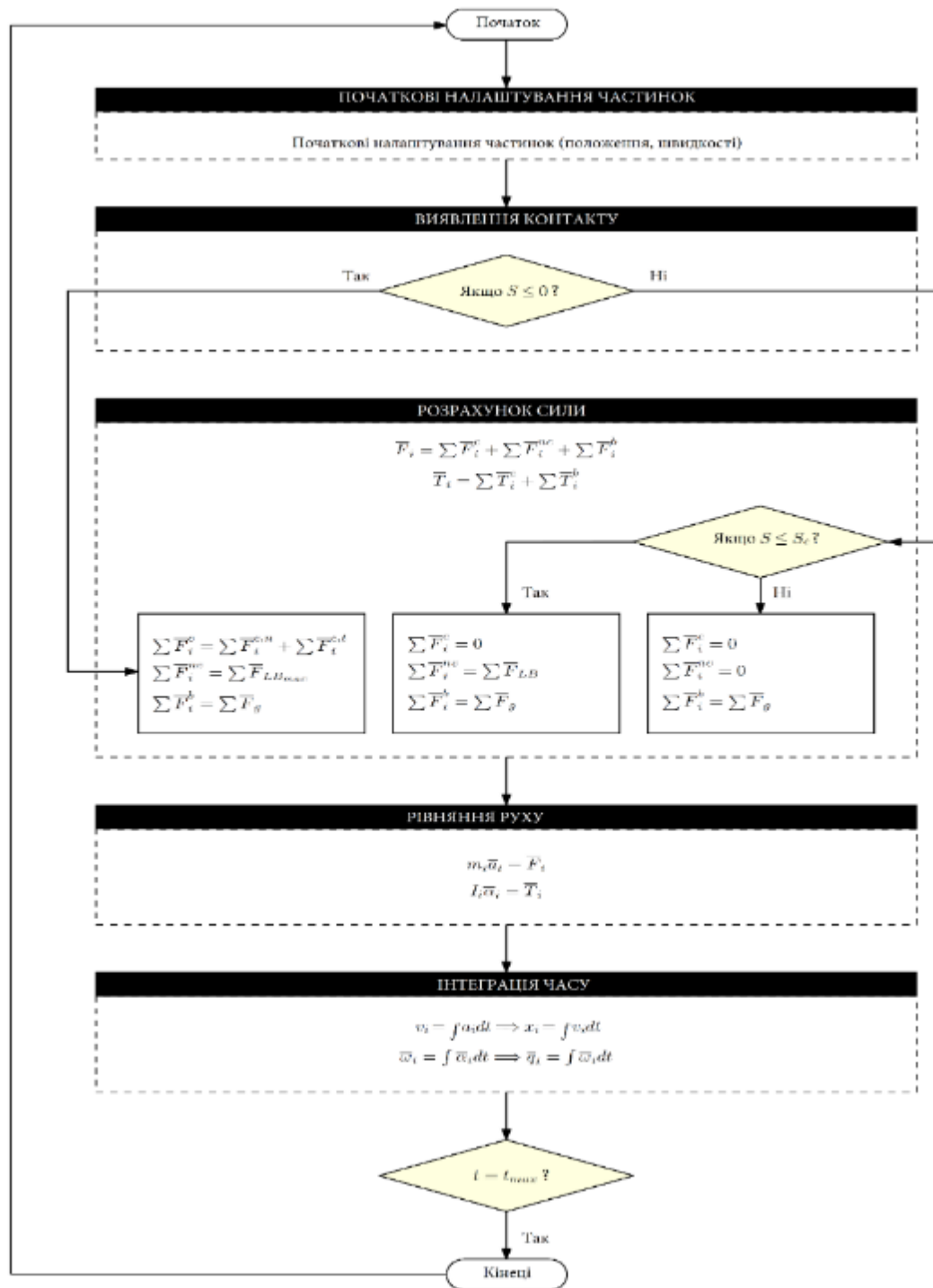


Рисунок 2.5 – Схема розрахунку методом дискретних елементів (DEM)

У першому випадку контактуючі частинки ще не досягли мінімального вмісту рідини, тому рідинний міст не утворюється. У другому випадку лише один

з партнерів може сприяти утворенню мосту, а в останньому випадку обидві частинки надають рідину для мосту.

Таблиця 2.1 – Різні можливі значення дистрибутивного об'єму рідини V_D на основі вмісту вологи частинок, між якими може утворитися рідинний міст

	Частинка i	Частинка j	Розподілюваний об'єм рідини
Випадок 1	Сухий/вологий стан $V_L^i \leq V_{Lmin}^i$	Сухий/вологий стан $V_L^j \leq V_{Lmin}^j$	$V_D = 0$
Випадок 2	Сухий/вологий стан $V_L^i \leq V_{Lmin}^i$	Вологий стан $V_L^j > V_{Lmin}^j$	$V_D = V_L^j - V_{Lmin}^j$
Випадок 3	Вологий стан $V_L^i > V_{Lmin}^i$	Вологий стан $V_L^j > V_{Lmin}^j$	$V_D = (V_L^i - V_{Lmin}^i) + (V_L^j - V_{Lmin}^j)$

Хоча кількість рідини, яку можна передати в рідинний міст, теоретично дорівнює V_D , у моделі вводиться обмеження для рідинного мосту, щоб уникнути утворення кластерів рідини. Таким чином, об'єм рідинного мосту V_{LB}^{ij} визначається за формулою:

$$V_{LB}^{ij} = \min(V_D, V_{LBmax}) \quad (2.3)$$

де обмежувальне значення V_{LBmax} визначається за формулою:

$$V_{LBmax} = \beta r_p^3 \quad (2.4)$$

і значення β вибирається таким чином, щоб рідинні мости залишалися в межах пандулярного режиму. Для випадкової щільної упаковки однорозмірних сфер максимальний доступний об'єм пор визначається як $\beta = 0.33$. Однак, оскільки в пандулярному режимі передбачається низька насиченість, може бути обрано значення $\beta = 0.058$, щоб менше ніж 6% простору займали рідинні мости. На рисунку 2.6 показано вміст рідини в частинках при утворенні рідинного мосту для випадків 2 і 3. Поки $V_D \leq V_{LBmax}$, рідина передається в міст, доки об'єм рідини частинок не стане меншим або рівним V_{Lmin} . Якщо $V_D > V_{LBmax}$, надлишкова рідина

$V_E = V_D - V_{LB_{max}}$ залишається на частинках у вигляді рідинної плівки з об'ємами V_E^i та V_E^j , пропорційно до існуючого об'єму кожної частинки.

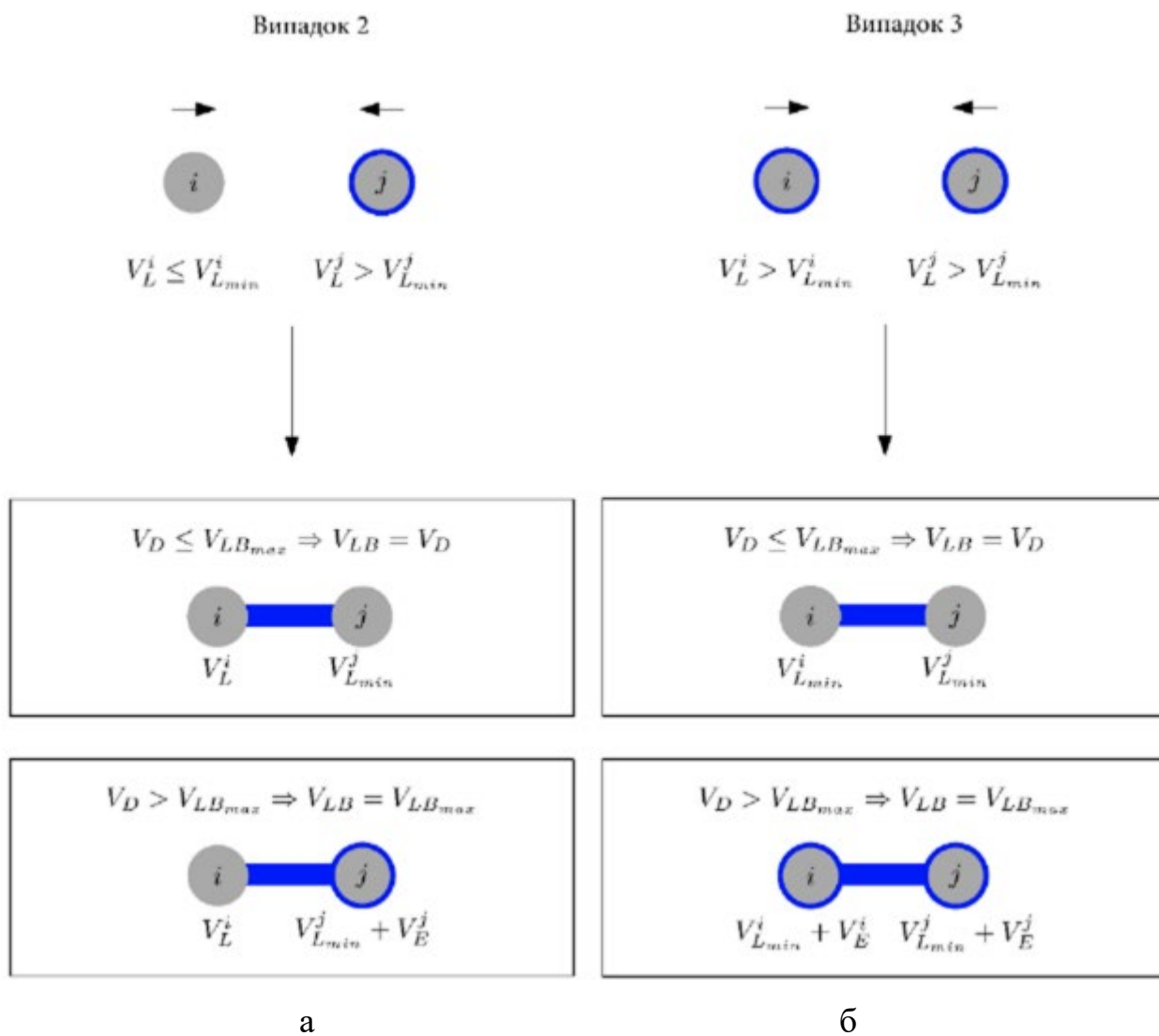


Рисунок 2.6 – Ілюстрація (а) об'єму вологи частинок і рідкого мосту під час утворення рідкого мосту для випадку 2; (б) об'єму вологи частинок і рідкого мосту під час утворення рідкого мосту для випадку 3

Після розриву рідинного мосту між двома частинками об'єм мосту перерозподіляється, як показано на рисунку 3-9а. Якщо частинки мають декілька контактів, рідина передається до індивідуальних мостів, доки не досягне

максимального об'єму мосту. Будь-яка залишкова рідина потім додається до об'ємів рідинної плівки частинок.

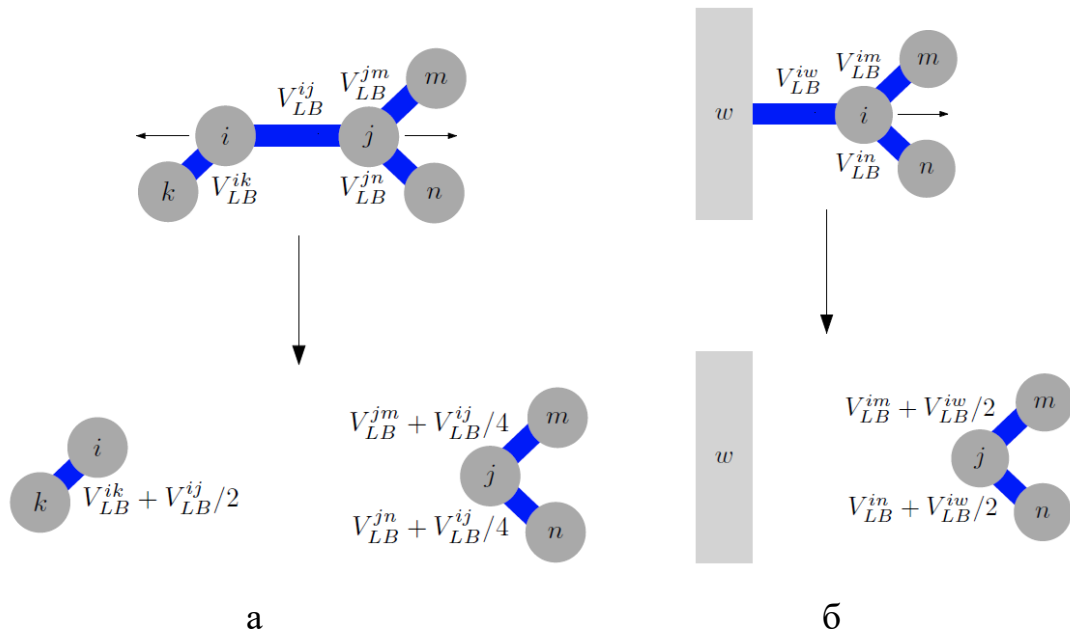


Рисунок 2.7 – Ілюстрація перерозподілу рідини після розриву рідкого мосту між (а) двома частинками; (б) частинкою і стінкою.

2.3 Формулювання чисельної моделі

Нагадаємо, що основна ідея методу дискретних елементів (DEM) полягає у визначенні траєкторій кожної частинки в системі, тобто у визначенні положення та орієнтації частинок на кожному часовому кроці. Для однієї пари зіткнених частинок це можна зробити аналітично, інтегруючи закони Ньютона. Однак для багаточастинкових систем аналітичні рішення неможливі, і необхідно використовувати числові методи для визначення еволюції системи. Мета числової схеми полягає в тому, щоб наблизити розв'язок диференціального рівняння за допомогою ряду Тейлора. У цьому випадку диференціальне рівняння, яке дозволяє розв'язати положення кожної частинки i , є рівнянням трансляційного руху, яке можна переписати як:

$$\frac{d^2 \vec{r}_i(t)}{dt^2} = \frac{\sum \vec{F}_i}{m_i} \quad (2.5)$$

Це рівняння другого порядку можна звести до двох диференціальних рівнянь першого порядку з відповідними початковими умовами:

$$\begin{cases} \frac{d\vec{r}_i(t)}{dt} = \vec{v}_i(t) , & \vec{r}_i(0) = \vec{r}_{0_i} \\ \frac{d\vec{v}_i(t)}{dt} = m_i^{-1} \sum \vec{F}_i = \vec{a}_i(t) , & \vec{v}_i(0) = \vec{v}_{0_i} \end{cases} \quad (2.6)$$

Аналогічно можна сформулювати диференціальні рівняння для рівняння руху обертання:

$$\begin{cases} \frac{dq_i}{dt} = \frac{1}{2} [0 \ \omega_{ix} \ \omega_{iy} \ \omega_{iz}]^T \otimes q_i , & \vec{r}_i(0) = \vec{r}_{0_i} \\ \frac{d\vec{\omega}_i(t)}{dt} = \mathbf{I}^{-1} \sum \vec{T}_i = \vec{\alpha}_i(t) , & \vec{\omega}_i(0) = \vec{\omega}_{0_i} \end{cases} \quad (2.7)$$

Такі диференціальні рівняння першого порядку зазвичай добре підходять для вирішення методом Ейлера. Проте цей метод не є придатним для інтеграції законів Ньютона, оскільки він не зберігає дві важливі властивості при розгляді потенційних (еластичних) сил: збереження енергії та оборотність. Для цього були розроблені інші методи, зокрема алгоритм Velocity Verlet, що зберігає фізичні властивості системи. Виведення схеми є наступним. Спочатку функція еволюції положення отримується шляхом простого об'єднання рівняння та рівняння руху:

$$\vec{r}(t + \Delta t) = \vec{r}(t) + \Delta t \cdot \vec{v}(t) + \frac{\Delta t^2}{2} \cdot \vec{a}(t) + O(\Delta t^3) \quad (2.8)$$

Далі можна також виконати розклад Тейлора для наближення швидкості на наступному часовому кроці:

$$\vec{v}(t + \Delta t) = \vec{v}(t) + \Delta t \cdot \frac{d\vec{v}}{dt}(t) + \frac{\Delta t}{2} \cdot \frac{d^2\vec{v}}{dt^2}(t) + O(\Delta t^3) \quad (2.9)$$

Невідомі члени в цьому виразі є похідними швидкості. Другу похідну можна виразити через відомі величини, розклавши:

$$\frac{d\vec{v}}{dt}(t + \Delta t) = \frac{d\vec{v}}{dt}(t) + \Delta t \cdot \frac{d^2\vec{v}}{dt^2}(t) + O(\Delta t^2) \quad (2.10)$$

Розв'язок цього рівняння для другої похідної дає:

$$\frac{d^2 \vec{v}}{dt^2}(t) = \frac{d \vec{v}}{dt}(t + \Delta t) - \frac{d \vec{v}}{dt}(t) + O(\Delta t^3) \quad (2.11)$$

Тепер підставляємо цей вираз та рівняння руху в рівняння, що дає наближення для еволюції швидкості:

$$\vec{v}(t + \Delta t) = \vec{v}(t) + \frac{\vec{a}(t) + \vec{a}(t + \Delta t)}{2} \Delta t + O(\Delta t^3) \quad (2.12)$$

Ігноруючи члени вищого порядку, наближення Velocity Verlet зводяться до:

$$\begin{aligned} \vec{r}(t + \Delta t) &= \vec{r}(t) + \vec{v}(t) \Delta t + \frac{\vec{a}(t)}{2} \Delta t^2 \\ \vec{v}(t + \Delta t) &= \vec{v}(t) + \frac{\vec{a}(t) + \vec{a}(t + \Delta t)}{2} \Delta t \end{aligned} \quad (2.13)$$

Зрозуміло, що алгоритм для положення залежить лише від величин на поточному часовому кроці, тоді як для алгоритму швидкості необхідно зберігати прискорення для двох різних часових кроків: t і $t + \Delta t$. Цього можна уникнути, розділивши алгоритм для швидкості на два інтеграційні кроки з половинним часовим кроком.

1. Інтегруйте (кутові) швидкості на половину кроку часу:

$$\begin{aligned} \vec{v}_i(t + \Delta t/2) &= \vec{v}_i(t) + \frac{\Delta t}{2} \vec{a}_i(t) \\ \vec{\omega}_i(t + \Delta t/2) &= \vec{\omega}_i(t) + \frac{\Delta t}{2} \vec{\alpha}_i(t) \end{aligned} \quad (2.14)$$

2. Використовуйте обчислені значення для інтеграції положень і орієнтацій на повний крок часу:

$$\begin{aligned} \vec{r}_i(t + \Delta t) &= \vec{r}_i(t) + \vec{v}_i(t + \Delta t/2) \Delta t \\ \mathbf{q}_i(t + \Delta t) &= \mathbf{q}_i(t) + \frac{1}{2} [0 \ \omega_{ix}(t + \Delta t/2) \ \omega_{iy}(t + \Delta t/2) \ \omega_{iz}(t + \Delta t/2)]^T \otimes \mathbf{q}_i(t) \Delta t \end{aligned} \quad (2.15)$$

3. Обчисліть (кутові) прискорення з сил і моментів на поточному кроці часу:

$$\begin{aligned} \vec{a}_i(t + \Delta t) &= m_i^{-1} \sum \vec{F}_i(t + \Delta t) \\ \vec{\alpha}_i(t + \Delta t) &= \mathbf{I}_i^{-1} \sum \vec{T}_i(t + \Delta t) \end{aligned} \quad (2.16)$$

4. Інтегруйте (кутові) швидкості на ще один півкрок часу:

$$\begin{aligned}\vec{v}_i(t + \Delta t) &= \vec{v}_i(t + \Delta t/2) + \frac{\Delta t}{2} \vec{a}_i(t + \Delta t) \\ \vec{\omega}_i(t + \Delta t) &= \vec{\omega}_i(t + \Delta t/2) + \frac{\Delta t}{2} \vec{\alpha}_i(t + \Delta t)\end{aligned}\quad (2.17)$$

Оскільки числова схема є явним розв'язувачем, важливо визначити відповідний крок часу, який забезпечує стабільність схеми інтеграції. У літературі доступні кілька апроксимацій для кроку часу залежно від закону контакту. Як правило, крок часу в DEM-симуляціях із сухими частинками базується на події зіткнення частинок. Для моделі LSD контакт частинок є аналогічним до загасаючого гармонічного осцилятора, в якому тривалість контакту t_c між двома частинками визначається половиною періоду коливань системи маси i пружини:

$$t_c = \frac{\pi}{\omega} \quad (2.18)$$

2.4 Висновки з розділу

1. Для моделювання змішування частинок у змішувачі необхідно враховувати різні типи взаємодій між частинками залежно від їхнього вологовмісту. Під час контакту сухих частинок виникають сили відштовхування, тоді як для вологих частинок утворюються рідинні мости, які забезпечують когезійні сили. Система дискретних елементів (DEM) дозволяє моделювати ці взаємодії і, враховуючи їх, можна оцінити рівень змішування.

2. Числова модель для дискретного елементного методу (DEM) будується на основі інтеграції законів Ньютона для багаточастинкових систем, де кожна частинка підлягає обчисленню траєкторії з урахуванням її положення та орієнтації. Оскільки метод Ейлера не забезпечує точне збереження енергії, для інтеграції використовують алгоритм Velocity Verlet, який дозволяє наближати швидкості та положення частинок з високою точністю. Для забезпечення стабільності числової схеми важливо вибрати правильний часовий крок, який не перевищує певну частку часу контакту між частинками.

3 МЕТОДИКА ЧИСЕЛЬНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ЗМІШУВАННЯ

3.1 Умови та процедура симуляції

Промислова система з гранульованими потоками зазвичай містить тисячі або мільйони дискретних частинок, які взаємодіють одна з одною через фізичні та не фізичні контакти. Розробка обчислювальної моделі, здатної якісно відтворити поведінку такої системи, є складним завданням. По-перше, вирішувач повинен мати можливість працювати з комплексними геометріями, великою кількістю частинок та їх взаємодіями. Водночас числовий код має ефективно використовувати апаратні ресурси для виконання такої масштабної симуляції. Симуляції можуть стати нестабільними, якщо числовий крок часу занадто великий, що призводить до вигаданої поведінки частинок через числові помилки; з іншого боку, надто малий крок часу не дозволяє виконати симуляцію за розумний час. Більше того, значення кроку часу визначається як пряма функція параметрів моделі, залежно від закону контакту, який використовується для опису взаємодій між частинками. Отже, основним викликом при встановленні параметрів симуляції є вибір таких значень, які забезпечать як розумний крок часу, так і реалістичну поведінку матеріалу в масі.

У розділі 2 були представлені різні параметри контакту та міграції рідини як вхідні для симуляції. Повний набір вхідних параметрів має бути ретельно підібраний для того, щоб модель максимально відповідала реальній фізичній системі. Методи, описані в літературі для визначення цих параметрів, можна умовно поділити на дві групи. Підхід прямого вимірювання передбачає пряме вимірювання параметрів контакту на рівні частинки або контакту. Цей метод не використовується широко, оскільки більшість властивостей важко виміряти, особливо на мікрорівні. Більше того, виміряні значення застосовні лише тоді, коли

в симуляції використовуються справжні розміри та форма частинок, а контактна модель точно відтворює фактичну поведінку контакту. Основною перевагою цього підходу є те, що виміряні значення завжди є дійсними, незалежно від контактної моделі та коду DEM, який використовується. У другому підході, підході калібрування в масі, експерименти налаштовуються для відтворення симуляції, а вхідні параметри підбираються методом проб і помилок так, щоб їх комбінація в симуляції давала поведінку матеріалу в масі, яка порівнянна з експериментальним (макроскопічним) результатом. Основним недоліком цього підходу є те, що різні комбінації параметрів DEM можуть дати однакову поведінку в масі. Отже, цей метод не гарантує, що після калібрування моделі для певної програми вона буде точною для іншої. Процес калібрування є дуже трудомістким, і порівняння або оцінка впливу вхідних параметрів на результати симуляції стає складнішою в міру збільшення кількості вхідних параметрів. З цієї причини часто проводяться аналізи чутливості для оцінки впливу різних вхідних даних і, відповідно, їхньої важливості на основі їхнього впливу. За результатами дослідження чутливості можна виділити зменшений набір важливих параметрів для етапу калібрування. Основною метою симуляцій у цьому дослідженні є проведення аналізу чутливості вхідних параметрів.

3.2 Геометрія змішувача

Для симуляцій використовувалась горизонтальна, одновальна циліндрична трубна гвинтова установка, як показано на рисунку 3.1. Через її геометричну складність модель була створена в NX, а потім імпортована в Star-CCM+ у вигляді бінарного STL-файлу (в якому геометрія представлена як сукупність трикутних поверхонь) за допомогою інструменту `readTriangleWall`. При налаштуванні симуляції були враховані кілька геометричних аспектів. Першим завданням було визначити змішувальний шнек як обертову поверхню, тоді як корпус змішувача

залишався нерухомим.

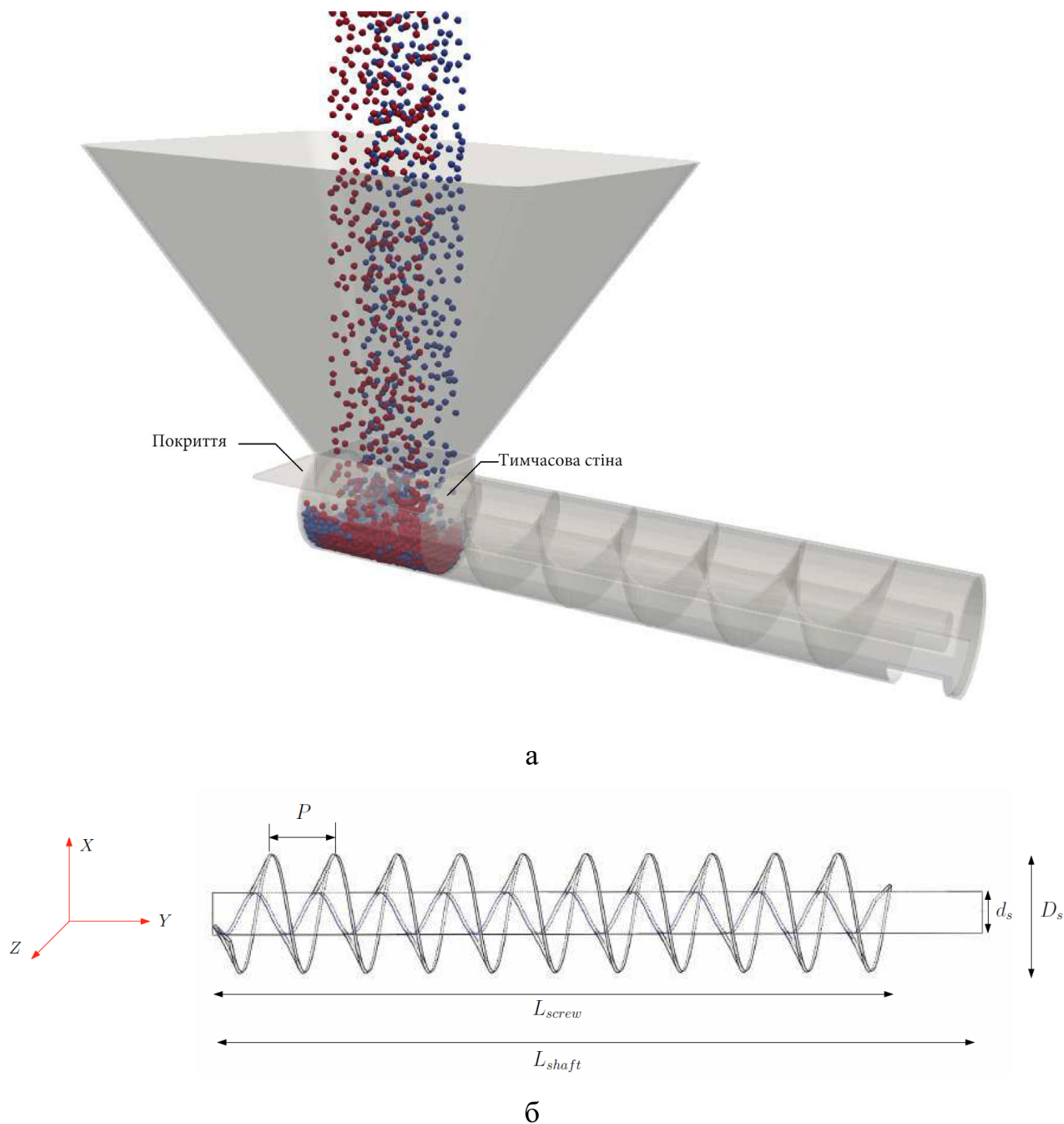


Рисунок 3.1 – (а) Геометрія, використана в моделюванні (б) ілюстрація змішувального шнека з представленими розмірами у таблиці 3.1.

Для цього функція `readTriangleWall` була вдосконалена у цьому

дослідженні, щоб включати додаткові параметри для імпортованих стінок. Зокрема, була створена можливість призначати кутову швидкість і відповідний центр обертання для певного набору стінок, що надає користувачеві свободу присвоювати різні властивості вибраним частинам геометрії. Іншим моментом було врахування зазору між шнеком і трубою.

Цю відстань мінімізували, щоб уникнути застрягання частинок між лопаттю та стінкою труби, що могло призвести до їх проштовхування крізь стінки. Нарешті, до геометрії були додані деякі стінки для допомоги в симуляції. Щоб запобігти переміщенню частинок далі по трубі, під час фази осідання було встановлено тимчасову стінку (рисунок 3.1) як бар'єр, який видаляється перед тим, як шнек почне рухатись. Після того як частинки осіли, труба закривається кришкою, а вал починає обертатися. Кришка додається до симуляції, щоб запобігти "вилітанням" частинок із труби та їх повторному потраплянню в бункер. Елемент змішування та система координат показані на рисунку 3.1. Відповідні розміри гвинта наведено в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 – Розміри шнека в конвеєрній системі

Параметр	Значення
Довжина шнека L_{screw} [м]	0,472
Довжина вала L_{shaft} [м]	0,55
Крок P [м]	0,045
Діаметр шнека D_s [м]	0,09
Діаметр вала d_s [м]	0,03

3.3 Частинки компонентів та їх взаємодії

На початку симуляції частинки генеруються випадковим чином та розміщуються на вході завантажувача. Після цього їм дозволяється вільно падати під дією гравітації та осідати (тобто до моменту, поки вони не розсіють певну кількість своєї енергії) у частині труби, закритій тимчасовою кришкою, поки

гвинт залишається нерухомим. Було встановлено, що введення когезійних частинок таким чином призводить до забивання над змішувальним гвинтом під час фази осідання через утворення рідинних мостів і подальшу адгезію частинок одна до одної до того, як матеріал осяде. Щоб мінімізувати цей ефект, вологі частинки вводяться з $\dot{\gamma} = 0$ під час фази осідання. Встановивши це значення поверхневого натягу, сили рідинного містка активуються, але повертають значення нуль, що дозволяє частинкам осідати без агломерації. У цьому дослідженні використовуються монофракційні частинки, оскільки це найпростіший випадок і потребує менших обчислювальних затрат у порівнянні з симуляціями, що використовують частинки різного розміру.

Як обговорювалося в розділі 2, у цьому дослідженні розглядаються лише частинки як матеріальні компоненти, тому потрібно лише два види частинок і один вид стінки. Крім того, потрібен окремий вид для всіх міжвидових взаємодій.

Як видно на рисунку 3.2, для моделі потрібно всього 24 вхідні параметри (жовті поля). У Розділі 3 обговорювалося, що часовий крок можна визначити як функцію параметрів частинок і (деяких) взаємодій, $\Delta t = f(m_{\text{eff}}; k_n; \gamma_n)$. Також було показано, що нормальна жорсткість, коефіцієнт демпфування та коефіцієнт відновлення пов'язані між собою через математичні співвідношення, що дозволяє визначити один з них, якщо відомі інші два. Ця взаємозалежність параметрів забезпечує перше зменшення кількості невідомих вхідних параметрів. Далі буде обговорено, як інші параметри, такі як жорсткість пружини та коефіцієнти демпфування тангенціальних ступенів свободи, можуть бути виведені з нормальної жорсткості та коефіцієнта демпфування для використання в якості попередніх оцінок. Це призводить до остаточного набору з 16 параметрів (показаних у жовтих полях, обведених червоними лініями на рисунку 3.2), які потрібно визначити для кожного з видів моделі. Короткий огляд цих параметрів наведено нижче для надання певної перспективи щодо обґрунтування їх вибору.

Жовті поля вказують, які параметри потрібно визначити шляхом

калібрування моделі, тоді як сірі поля можуть бути просто виведені з жовтих полів.

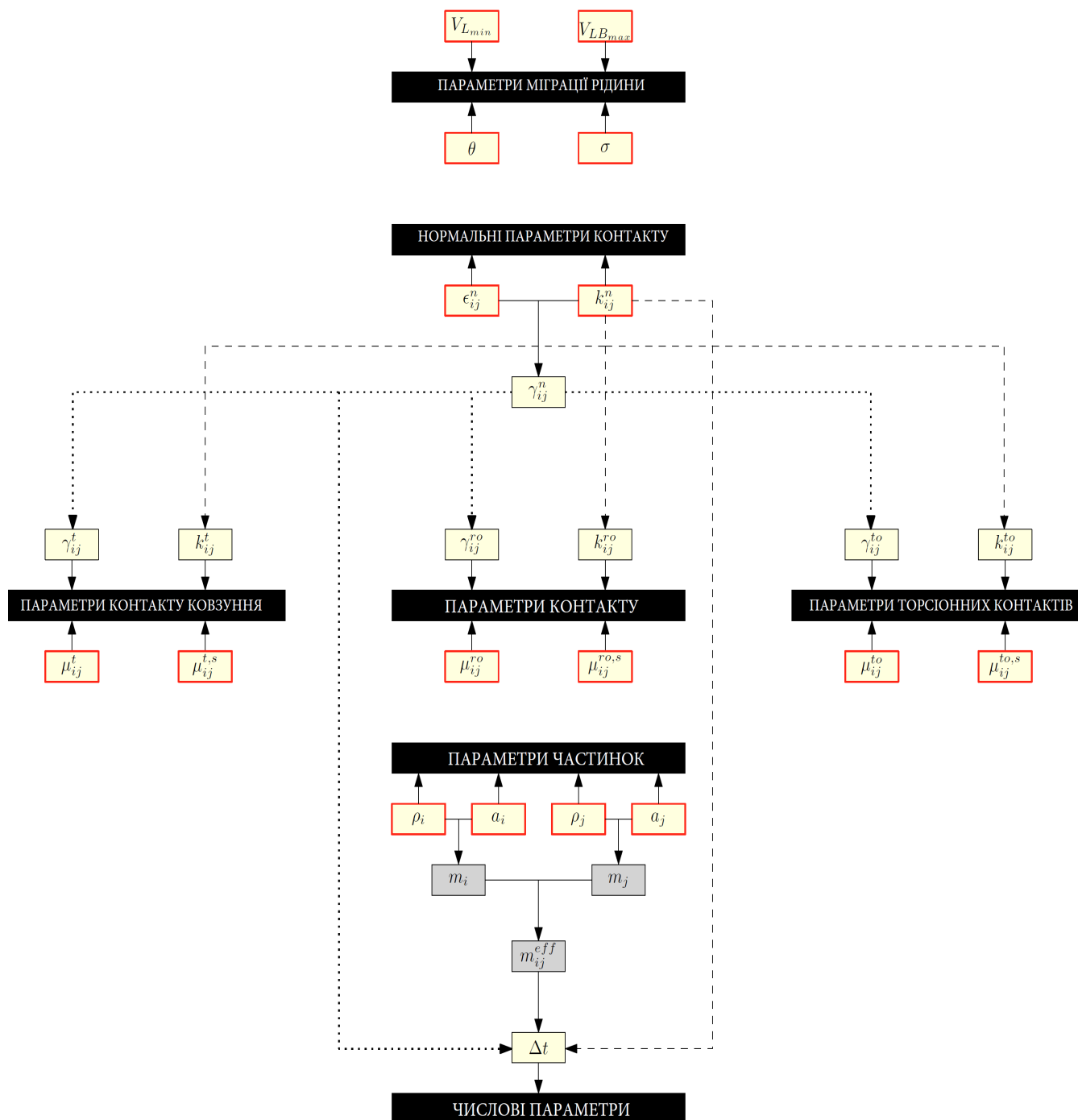


Рисунок 3.2 – Огляд параметрів вхідних даних частинок, взаємодії та числових параметрів з стрілками, що вказують, які параметри можуть бути обчислені як функції один від одного

Відповідні матеріально залежні властивості – це розмір частинок, густина, водопоглинання та кут контакту, а також поверхневий натяг для води.

3.4 Властивості компонентів кормів

Промислові системи містять дуже велику кількість індивідуальних частинок мікроскопічного розміру, що робить неможливим моделювати обчислювальний об'єм, використовуючи фактичний розмір частинок. Також неможливо точно відобразити фактичну форму кожної окремої частинки в симуляції. Тому на практиці вважається, що частинки є сферичними, і кількість частинок N_p часто зменшується відносно розміру області симуляції. Це можна зробити, масштабуючи розмір частинки, тобто використовуючи так звані псевдочастинки, які представляють колекцію несфальтованих частинок. Змінюючи розмір та форму частинок у симуляції, матеріальні властивості також повинні бути скориговані для збереження фактичних об'ємних властивостей.

Щодо густини, розрізняють густину частинок ρ та об'ємну густину ρ_b . Об'ємна густина зазвичай визначається як маса зразка об'ємного матеріалу, поділена на об'єм, зайнятий цим зразком, тобто об'ємна густина враховує об'єм частинок і порожнин між частинками в упаковці. Оскільки порожнини зазвичай заповнені повітрям, можна припустити, що маса порожнин незначна, і, отже, загальна маса приблизно дорівнює загальній масі частинок. Отже, об'ємна густина визначається за формулою:

$$\rho_b \approx \frac{m_p}{V_b} \quad (3.1)$$

Густина частинок, з іншого боку, враховує лише масу та об'єм, зайнятий твердими речовинами в упаковці:

$$\rho_p = \frac{m_p}{V_p} \quad (3.2)$$

При використанні масштабованих частинок відкориговані густини частинок

визначаються за допомогою такої методології:

1. Геометрія заповнюється частинками, дозволяючи їм падати під дією гравітації та осідати. Частинковий шар вирівнюється шляхом видалення всіх частинок вище певної вказаної висоти H у контейнері. Загальний зайнятий (об'ємний) об'єм V_b визначається на висоті H .

2. Загальна маса всіх частинок обчислюється:

$$m_p = \rho_p \times V_p = \rho_p \times \left(N_p \frac{4}{3} \pi a_p^3 \right) \quad (3.3)$$

3. Об'ємна густина обчислюється:

$$\rho_b = \frac{m_p}{V_b} \quad (3.4)$$

4. Об'ємна густина визначається для діапазону значень густини частинок, $\rho_p = [1000; 2000; 5000; 10000]$, а значення ρ_p , яке відповідає об'ємній густині матеріалу, визначається методом інтерполяції даних.

3.5 Параметри взаємодії компонентів кормів

Значення нормальної жорсткості пружини є важливим параметром, оскільки воно безпосередньо впливає на ступінь перекриття частинок і крок часу симуляції. Типові значення k_n зазвичай знаходяться в межах 10^6 – 10^8 Н/м, проте багато досліджень повідомляють про використання набагато менших значень на рівні 10^3 Н/м. Варто зазначити, що використання таких малих значень зазвичай виправдане в системах, де контактні сили не є домінуючими, наприклад, у системах з псевдозрідженими шарами. Проте у змішувачах контакти між частинками є критичними для руху, і вплив жорсткості пружини на характеристики зіткнення частинок має бути ретельно розглянуто. Такий аналіз можна провести, враховуючи еволюцію механічної енергії частинок, де загальна

механічна енергія частинки і визначається як сума потенційної енергії тяжіння, кінетичної енергії та еластичної потенційної енергії:

$$E_m = E_g + E_k + E_e = m_i g h + \frac{1}{2} m_i v_i^2 + \frac{1}{2} k_n \delta_{ij}^2 \quad (3.5)$$

Теоретично, коли тертям в аналізі нехтується, загальна механічна енергія зберігається. Це припущення вже дає орієнтовне значення жорсткості. Для демонстрації розглянемо простий випадок сферичної частинки, яка вільно падає з певної висоти на нерухому частинку. Спочатку частинка має потенційну енергію тяжіння через висоту, тобто $E_{m1} = E_{g1}$. В момент перед зіткненням вся потенційна енергія тяжіння перетворюється на кінетичну енергію, тому частинка досягає максимальної швидкості, і $E_{m2} = E_{k2}$. У процесі перекриття частинок кінетична енергія перетворюється на еластичну потенційну енергію. Нарешті, в момент максимального перекриття частинка зупиняється, і еластична потенційна енергія досягає максимуму, тому $E_{m3} = E_{e3}$. Цей приклад ілюструє, що для певної початкової відстані існують максимальна швидкість v_{max} та максимальне перекриття δ_{max} , при яких виконується закон збереження енергії. Припускаючи збереження механічної енергії для частинки і між станами 2 і 3, можна отримати таке вираження для необхідної нормальної жорсткості контакту:

$$k^n = \frac{m_i v_{i_{max}}^2}{\delta_{ij_{max}}^2} \quad (3.6)$$

Отже, для вибору жорсткості пружини спочатку необхідно оцінити максимальну швидкість у симуляції та значення максимального перекриття (частинка-частинка або частинка-стіна). Щодо перекриття можна сказати, що значення $\delta_{ij_{max}}$ зазвичай залежить від застосування; проте загальне правило:

$$\delta_{ij_{max}} = \pm 0.01 a_{eff} \quad (3.7)$$

Частинки в системі отримують свої швидкості від обертової лопаті змішувача, тому швидкість кінця лопаті може бути орієнтиром для максимальної швидкості:

$$v_{i_{max}} = \frac{\pi\Omega}{60} D_s \quad (3.8)$$

де D_s — діаметр лопаті гвинта, а n — швидкість обертання в об/хв. Тангенціальна жорсткість зазвичай визначається на основі аналітичних підходів, оскільки властивості тангенціальних ударів часто важко виміряти. Для спрощення це значення тангенціальної жорсткості приймається як номінальне в симуляціях. Хоча в літературі не було знайдено орієнтовних значень для жорсткості на кочення і крутіння, у симуляціях використовується таке ж значення.

Решта параметрів пов'язана з втратою енергії, тобто коефіцієнтами відновлення та тертя. Буде встановлено нормальний коефіцієнт відновлення, на основі якого можна знайти нормальний коефіцієнт дисипації γ^n . За аналогією з жорсткістю пружини, значення решти коефіцієнтів дисипації встановлюється як $\gamma^v / \gamma^n = 2/7$, де v відповідає за тангенціальні, кочення та крутіння. Щодо коефіцієнтів тертя, статичні коефіцієнти тертя зазвичай більші за динамічні; проте для спрощення їх часто вважають однаковими. Відповідно до цього припущення буде встановлено лише один коефіцієнт тертя для ковзання, кочення та кручення.

3.6 Висновки з розділу

Методика чисельного моделювання процесу змішування базується на правильному виборі вхідних параметрів і їх калібруванні для досягнення реалістичної поведінки системи. Основні виклики стосуються підбору кроку часу, який має бути досить малим для уникнення нестабільностей і забезпечення точності моделювання. Однак, параметри моделі, такі як жорсткість пружини, демпфування та коефіцієнти відновлення, мають взаємозалежні властивості, що дозволяє зменшити кількість невідомих і спростити процес калібрування.

4 РЕЗУЛЬТАТИ ЧИСЕЛЬНОГО МОДЕЛЮВАННЯ

4.1 Вплив параметрів взаємодії

Вплив тертя. Вплив усіх трьох коефіцієнтів тертя μ^s , μ^{ro} та μ^{to} аналізується шляхом проведення досліджень випадків, перелічених у таблиці 4.1. У референтному моделюванні (випадок 0) всі три коефіцієнти для всіх типів частинок встановлені на середньому рівні 0,5. Далі проведено шість інших моделювань (випадки 1-6), в яких кожен коефіцієнт встановлено на низькому рівні (0,1) і високому рівні (0,9), тоді як інші коефіцієнти залишаються на базовому значенні 0,5 для всіх типів частинок. На основі результатів цих досліджень виконано фінальний набір моделювань (випадки 7-10) для розмежування тертя частинка-стіна (μ_{01} ; μ_{02}) та тертя частинка-частинка (μ_{1-1} ; μ_{2-2} ; μ_{1-2}).

Таблиця 4.1 – Параметри моделі для аналізу чутливості до тертя при об'ємі заповнення 50 % і швидкості обертання 60 об/хв.

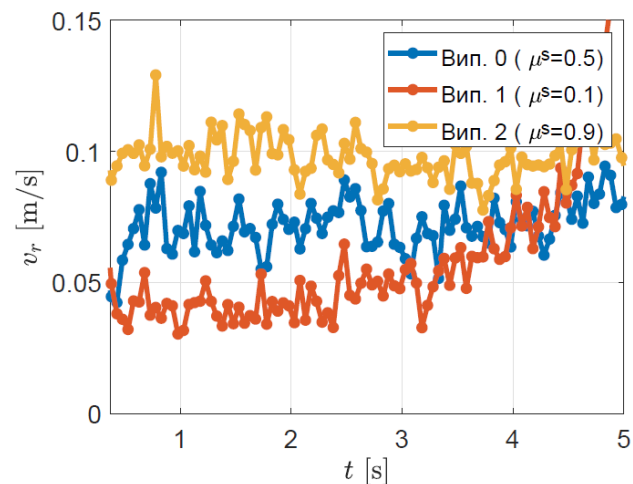
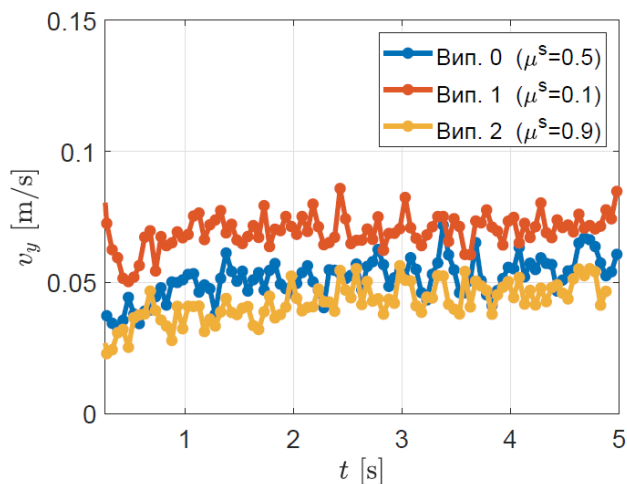
	Вид	ϵ^n	$\mu^s [-]$	$\mu^{ro} [-]$	$\mu^{to} [-]$
Випадок 0	всі	0,5	0,5	0,5	0,5
Випадок 1	всі	0,5	0,1	0,5	0,5
Випадок 2	всі	0,5	0,9	0,5	0,5
Випадок 3	всі	0,5	0,5	0,1	0,5
Випадок 4	всі	0,5	0,5	0,9	0,5
Випадок 5	всі	0,5	0,5	0,5	0,1
Випадок 6	всі	0,5	0,5	0,5	0,9
Випадок 7	0-1, 0-2 1-1, 2-2, 1-2	0,5	0,1	0,5	0,5
Випадок 8	0-1, 0-2 1-1, 2-2, 1-2	0,5	0,9	0,5	0,5
Випадок 9	0-1, 0-2 1-1, 2-2, 1-2	0,5	0,5	0,5	0,5
Випадок 10	0-1, 0-2 1-1, 2-2, 1-2	0,5	0,5	0,5	0,5

У кожному моделюванні швидкість обертання становить 60 об/хв, а кількість частинок залишається постійною, так що коефіцієнт заповнення приблизно дорівнює 0,5.

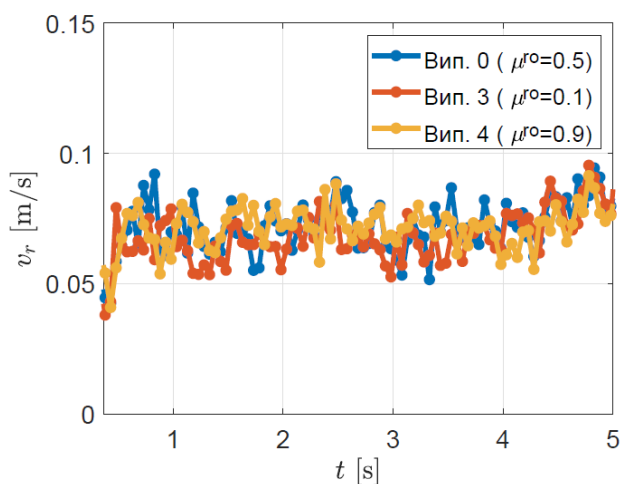
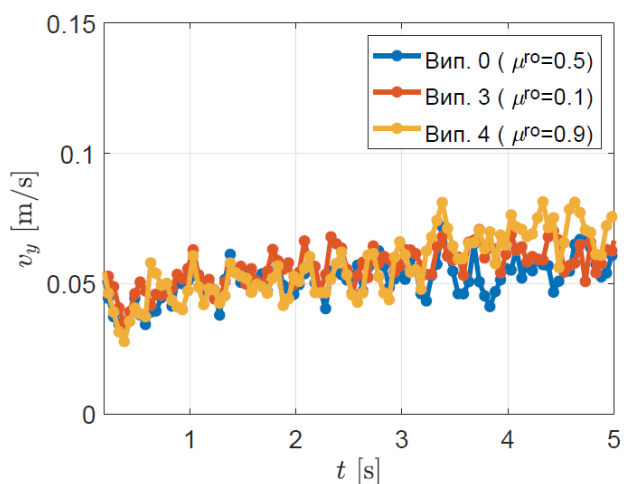
Швидкості частинок та схеми потоків. Швидкості частинок досліджуються для кращого розуміння потоку частинок. На рисунку 4.1 показано середню осьову швидкість у напрямку подачі v_y (ліворуч) та середню окружну (вихрову) швидкість $v_r = (v_x; v_z)$ (праворуч) для випадків 0-6. З графіків можна зробити кілька висновків. По-перше, осьові та вихрові криві швидкості для тертя перекошування і крутного тертя (рисунок 4.1) збігаються і демонструють схожі тенденції, що вказує на те, що варіація μ^{to} і μ^{lo} не має значного впливу на швидкість і напрямок руху частинок усередині шнекового конвеєра. Однак це не стосується коефіцієнта ковзного тертя (рисунок 4.1). Видно, що середня осьова швидкість зменшується зі збільшенням μ^s , що є очікуваним результатом, оскільки ковзне тертя перешкоджає осьовому руху частинок. Навпаки, середня вихрова швидкість зростає за вищих значень μ^s , оскільки частинки легше переносяться в тангенційному напрямку завдяки обертальному руху валу.

Рисунок 4.2 показує знімки потоку частинок для випадків ковзного тертя. Верхня частина чітко показує (здебільшого) осьовий напрямок потоку частинок при низькому ковзному терті. У міру збільшення тертя радіальний рух стає більш домінуючим, а змішувальна дія посилюється.

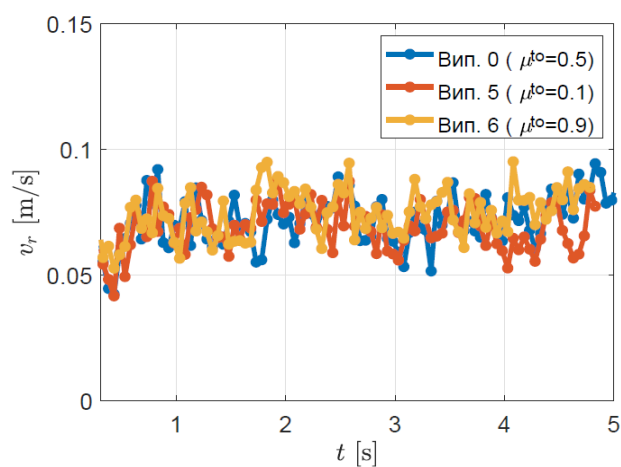
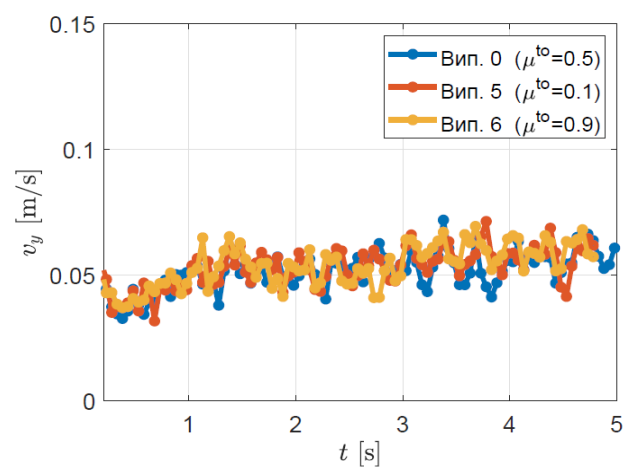
Рисунок 4.3 і 4.4 показують середнє осьове та радіальне положення частинок для різних коефіцієнтів тертя відповідно, з вертикальними лініями, що представляють стандартне відхилення. Спочатку проаналізуємо графіки, що відображають середнє осьове положення. Крутизна графіка вказує на те, наскільки швидко матеріал переміщується через конвеєр.



(а) Тертя ковзання



(б) Тертя кочення



(в) Тертя кручення

Рисунок 4.1 – Вплив (а) ковзного тертя, (б) кочення та (в) крутного тертя на середню осьову швидкість і середню швидкість обертання при 60 об/хв.

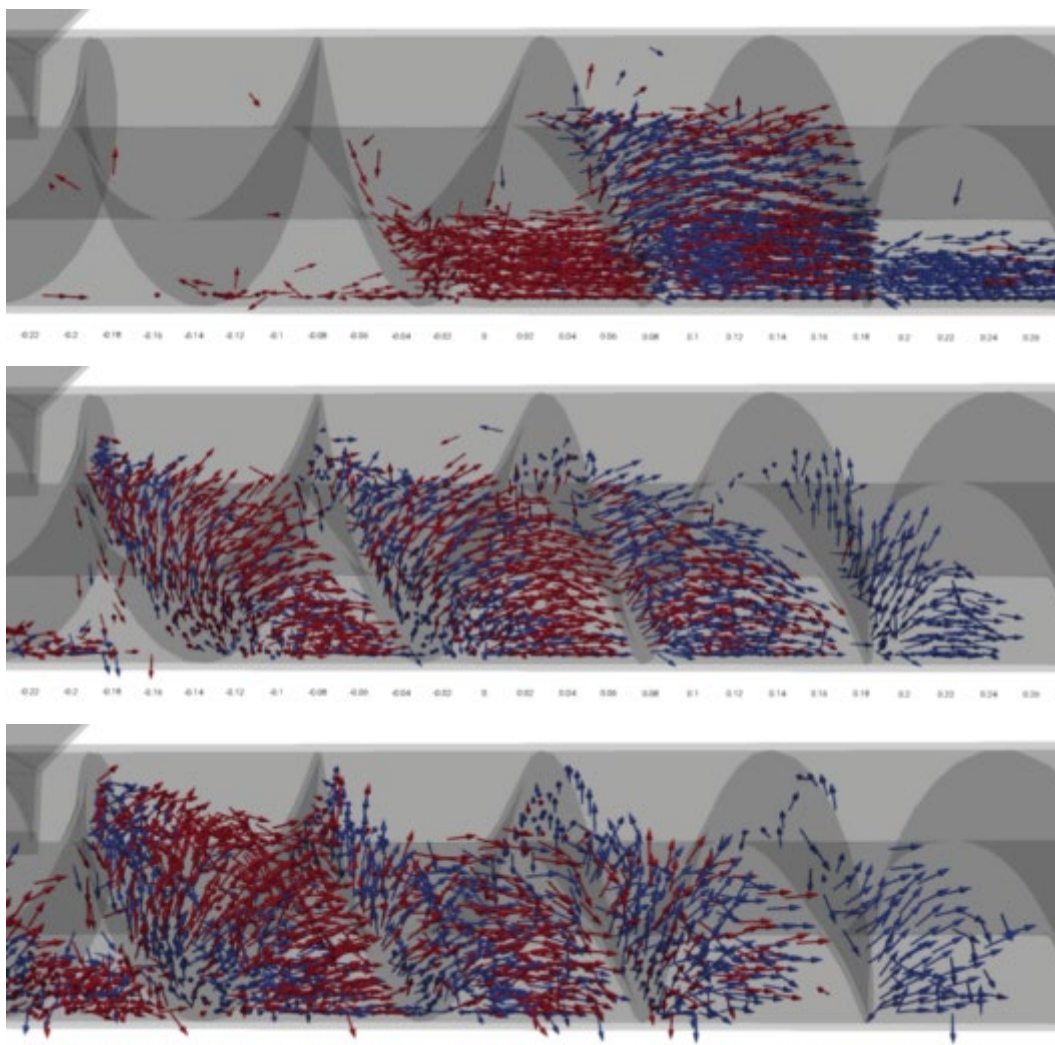


Рисунок 4.2 – Вплив ковзного тертя на напрямок потоку при (а) $\mu^s = 0,1$, (б) $\mu^s = 0,5$ та (в) $\mu^s = 0,9$

Як і очікувалося з обговорення швидкості частинок, стає зрозуміло, що потік частинок через шнековий конвеєр лише трохи залежить від μ^{to} (рисунок 4.4) і практично не залежить від μ^{to} (рисунок 4.4), тоді як матеріал рухається швидше від входу до виходу при зменшенні значень μ^s .

Рисунок 4.3 показує графіки для ковзного, перекочувального та крутного тертя щодо радіального положення. Ліві графіки показують загальні дані, з яких можна спостерігати, що криві повільно нахиляються вгору до кінця. Наприклад,

для випадку 1 на рисунку 4.3 (ліворуч) крива стає більш крутою після приблизно $t = 4$ с.

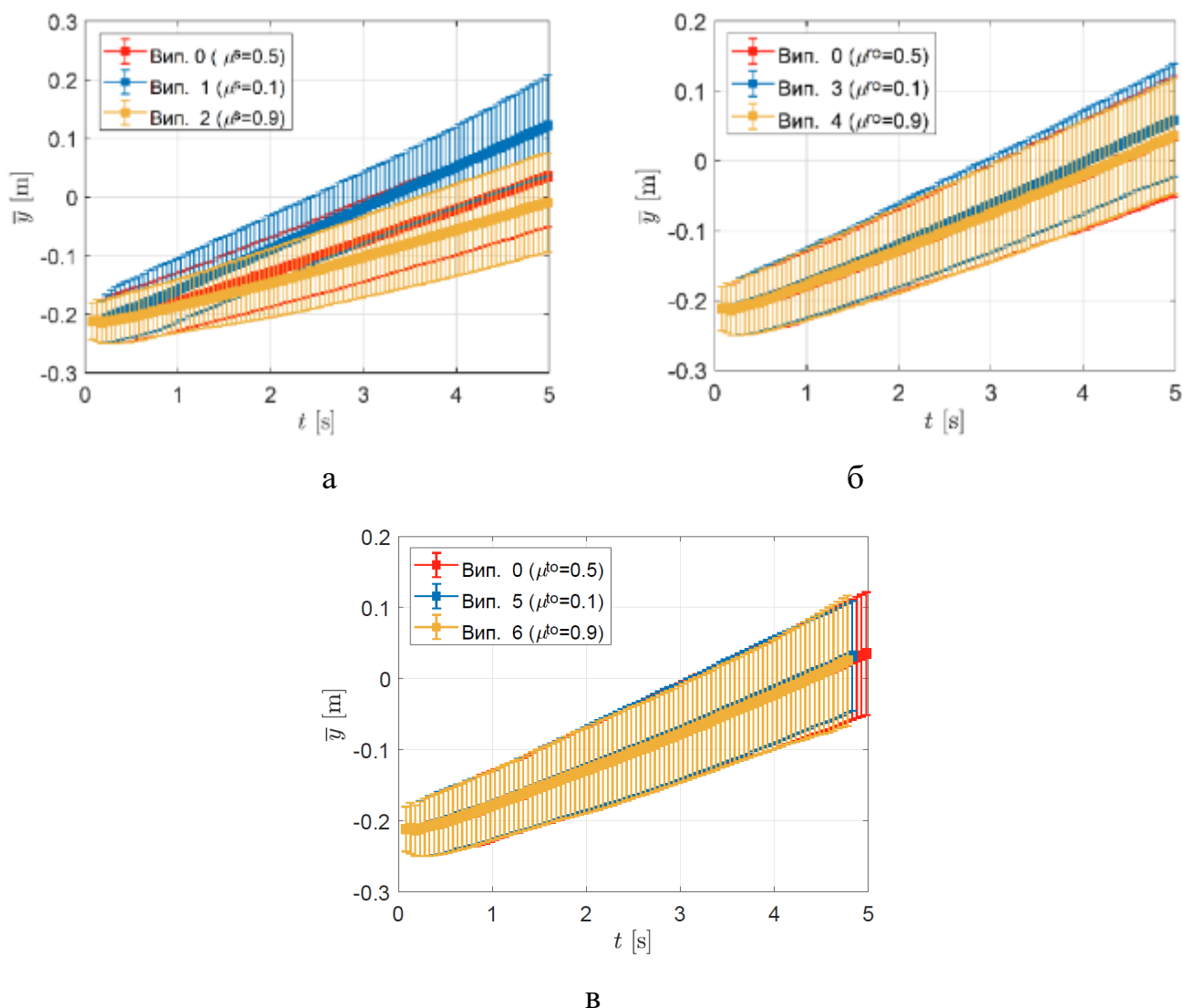


Рисунок 4.2 – Вплив (а) ковзного тертя, (б) кочення та (в) крутного тертя на середнє осьове положення частинок при 60 об/хв, з вертикальними лініями, що представляють стандартне відхилення

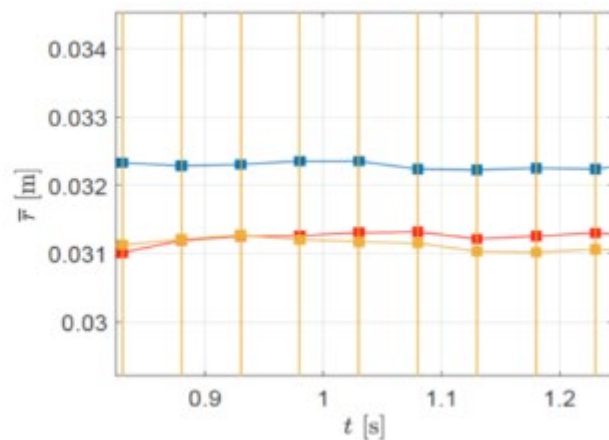
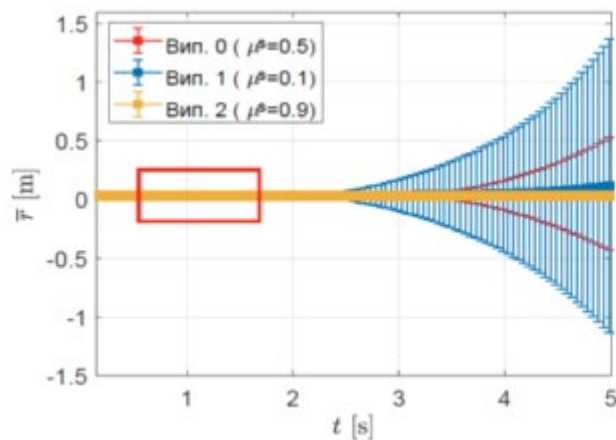
Оскільки середнє радіальне положення визначається координатою x , це вказує на те, що частинки вивантажуються на виході конвеєра, оскільки x збільшується для частинок, що випадають із системи. Праві графіки збільшені з

частини загального графіка, де частинки ще не були вивантажені, що охоплено червоними лініями. Після огляду всіх трьох графіків ще раз стає очевидним, що вплив крутного тертя незначний. Вплив ковзного тертя чітко видно, і здається, що різниця між профілями стає менш вираженою при більших значеннях μ^s . Дещо схожа тенденція спостерігається і для перекочувального тертя, хоча його вплив менш значний.

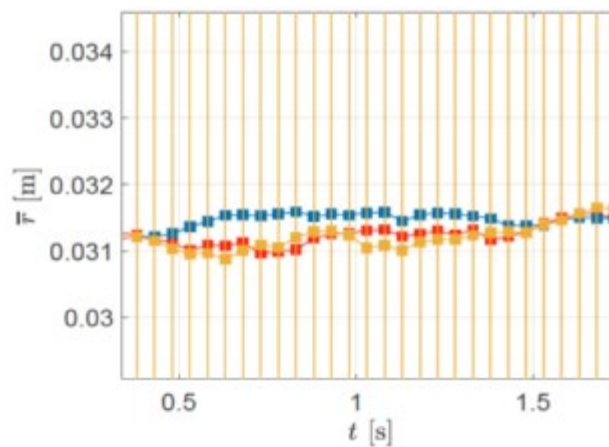
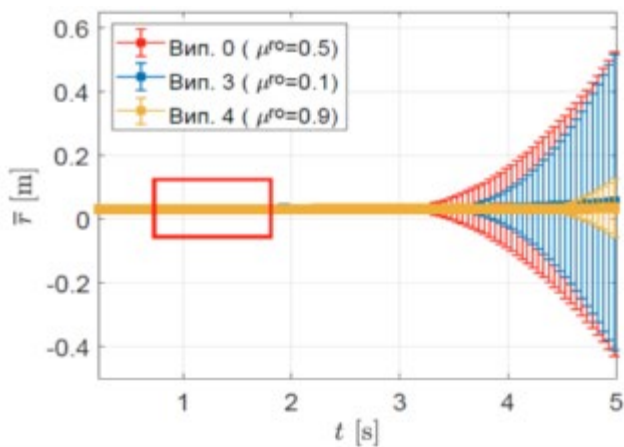
З першого набору моделювань було виявлено, що коефіцієнт ковзного тертя має значний вплив на поведінку матеріалу в шнековому конвеєрі. Раніше передбачалося, що однакове значення коефіцієнта тертя використовується для всіх типів частинок. Детальніший аналіз проводиться шляхом розмежування ковзного тертя між частинками (μ_{pp}^s) і між частинками та стінками (μ^{spw}) у випадках 7-10. Тому у випадках 7 і 8 лише тертя частинка-стіна встановлено на низькому та високому рівнях, тоді як у випадках 9 і 10 тертя частинка-частинка встановлено на низькому та високому рівнях, відповідно.

Подібно до попереднього аналізу середніх положень частинок, середні осьові та (збільшені) радіальні профілі. Загалом можна зробити висновок, що зміни більш виражені для тертя частинка-стіна, як для середнього осьового, так і для середнього радіального положення. Також профілі для тертя частинка-частинка показують ту ж тенденцію, що й на рисунку 4.4, тобто зміни в радіальному положенні стають менш помітними при збільшенні значень μ_{pp}^s .

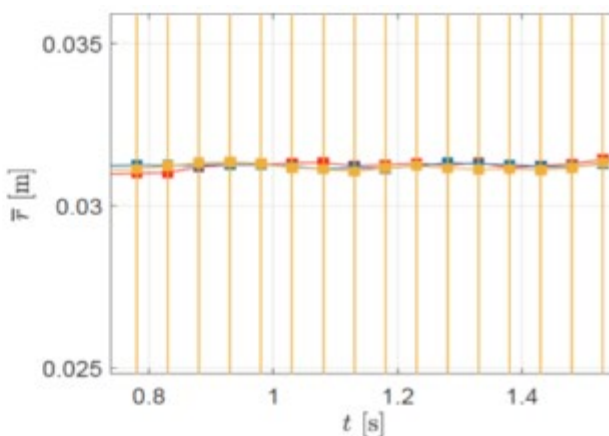
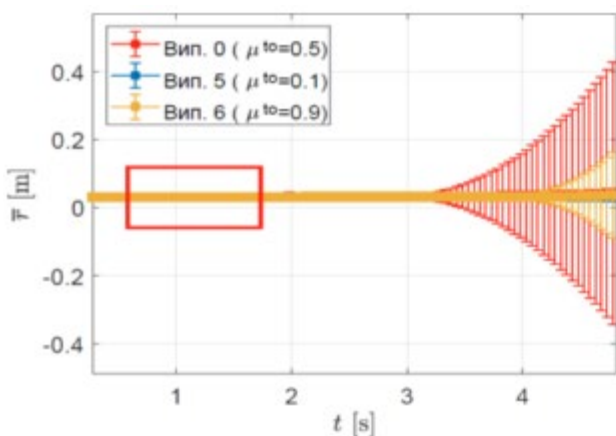
З попередніх аналізів вже можна зробити висновок, що низьке значення μ^s призводить до поганого змішування, оскільки частинки в основному переміщуються осьово як "блок" з обмеженим відносним рухом. Це підтверджується аналізом індексу змішування, як показано на рисунку 4.5. Рисунок 4.5 демонструє, що змішування значно менш чутливе до коефіцієнта обертового тертя і практично не підлягає впливу коефіцієнта крутильного тертя.



(а) Тертя ковзання

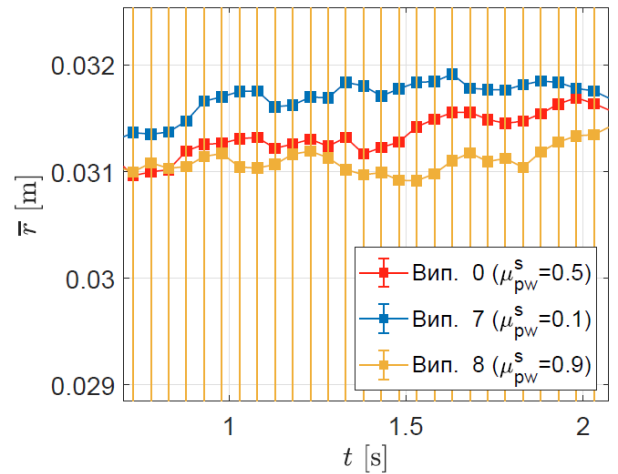
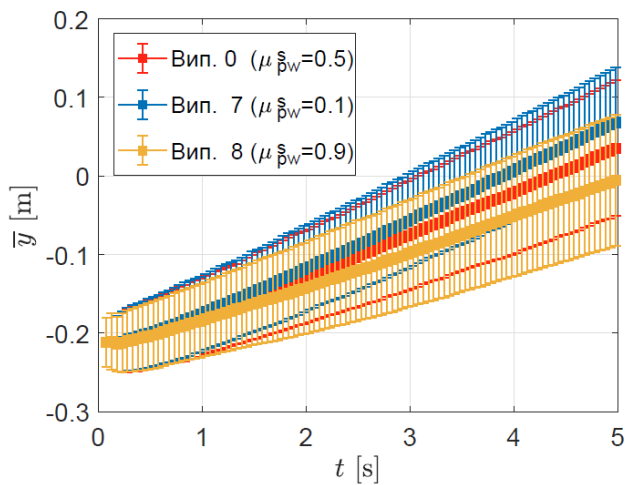


(б) Тертя кочення

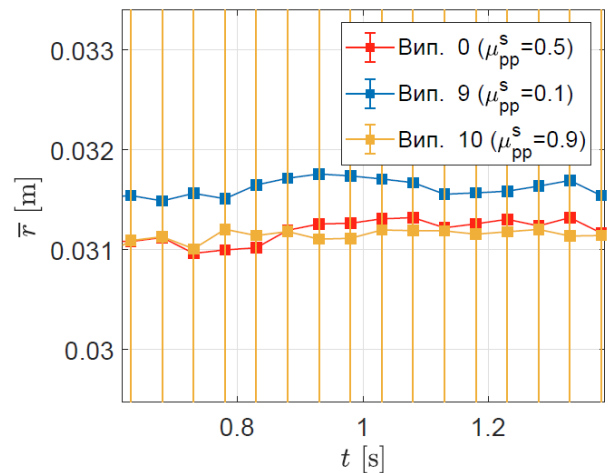
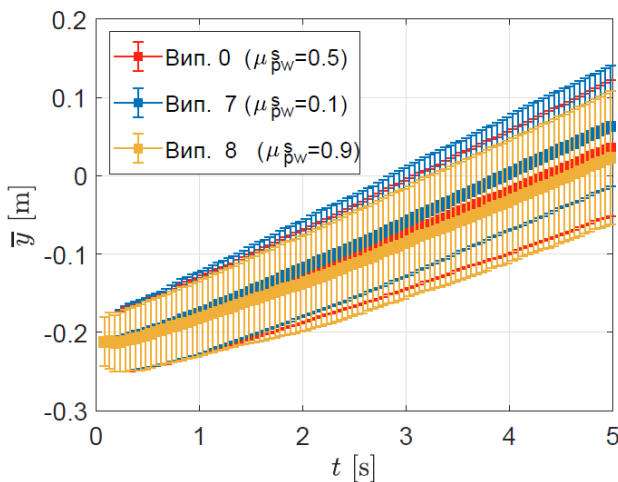


(в) Тертя кручення

Рисунок 4.3 – Вплив (а) тертя ковзання, (б) тертя кочення та (в) тертя кручення на середнє радіальне положення частинок для 60 об/хв, з вертикальними лініями, що представляють стандартне відхилення



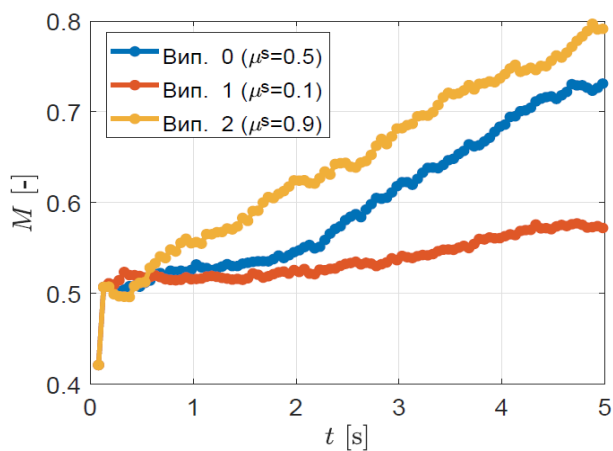
(a) Тертя ковзання між частинкою та стінкою



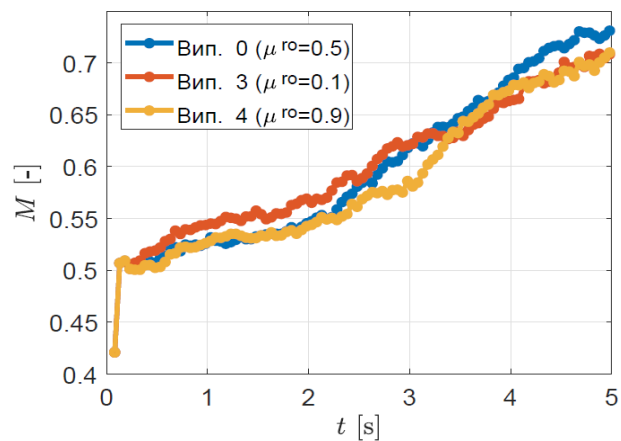
(b) Тертя ковзання між частинками

Рисунок 4.4 – Вплив (a) ковзного тертя між частинками та (b) ковзного тертя між частинками і стінками на середню осьову та (збільшену) радіальну позицію для 60 об/хв

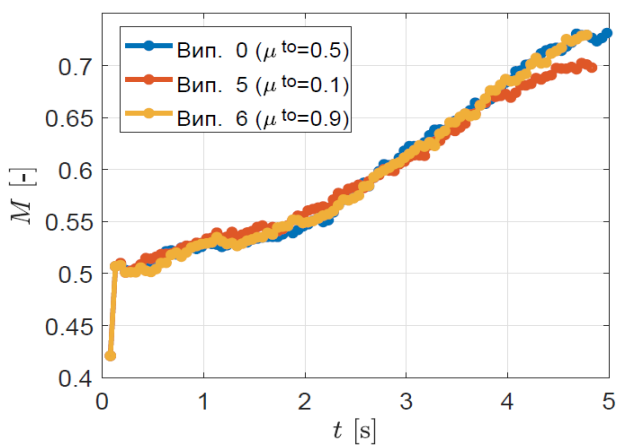
Нарешті, рисунки 4.5 показують вплив коефіцієнтів ковзного тертя між частинками і стінками на індекс змішування. З попередніх аналізів вже було встановлено, що обидва коефіцієнти впливають на потік; однак коефіцієнт тертя між частинками і стінками є більш значущим. Цей результат також відображається в індексах змішування.



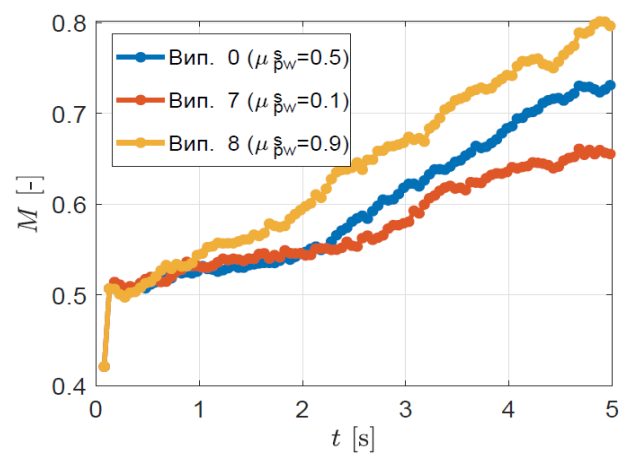
а



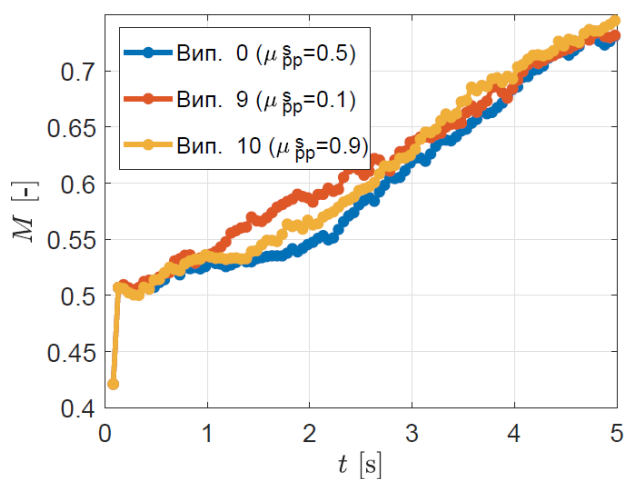
б



в



г



д

Рисунок 4.5 – Вплив (а) тертя ковзання, (б) тертя кочення, (в) тертя кручення, (г) тертя ковзання між частинками і стінками та (д) тертя ковзання між частинками на індекс змішування

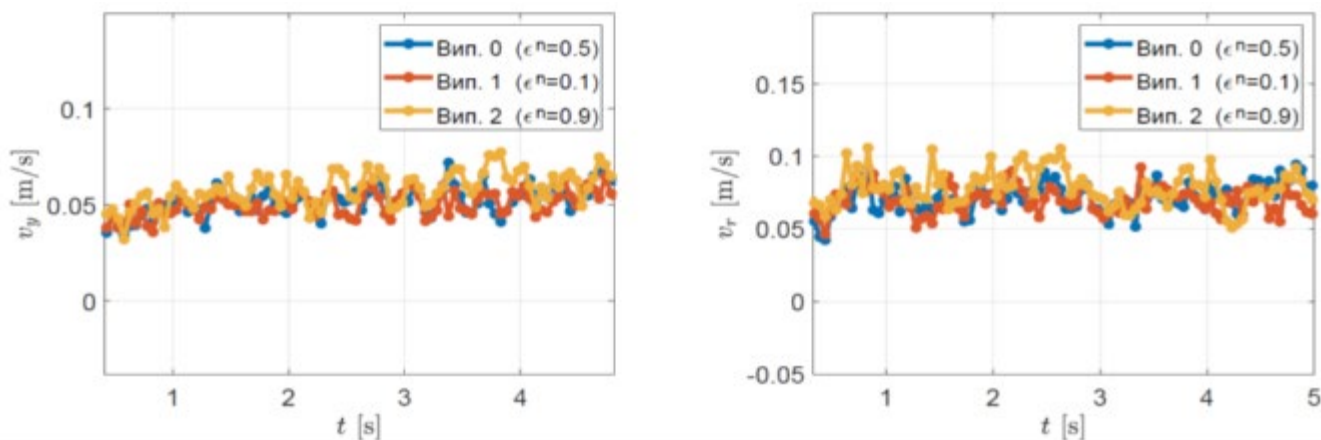
4.2 Вплив коефіцієнта відновлення

Далі розглядається вплив нормального коефіцієнта відновлення ϵ^n . Для базового випадку симуляції (випадок 0) для всіх видів використано середнє значення 0,5, а наступні симуляції виконані з використанням низького значення (випадок 1) і високого значення (випадок 2), як показано в таблиці 4.2. У кожній симуляції кількість частинок залишається сталою, так що заповнена частка дорівнює 0,5. Далі виконуються додаткові симуляції, в яких розглядається вплив коефіцієнтів відновлення між частинками (випадок 3 і 4) і між частинками та стінками (випадок 5 і 6).

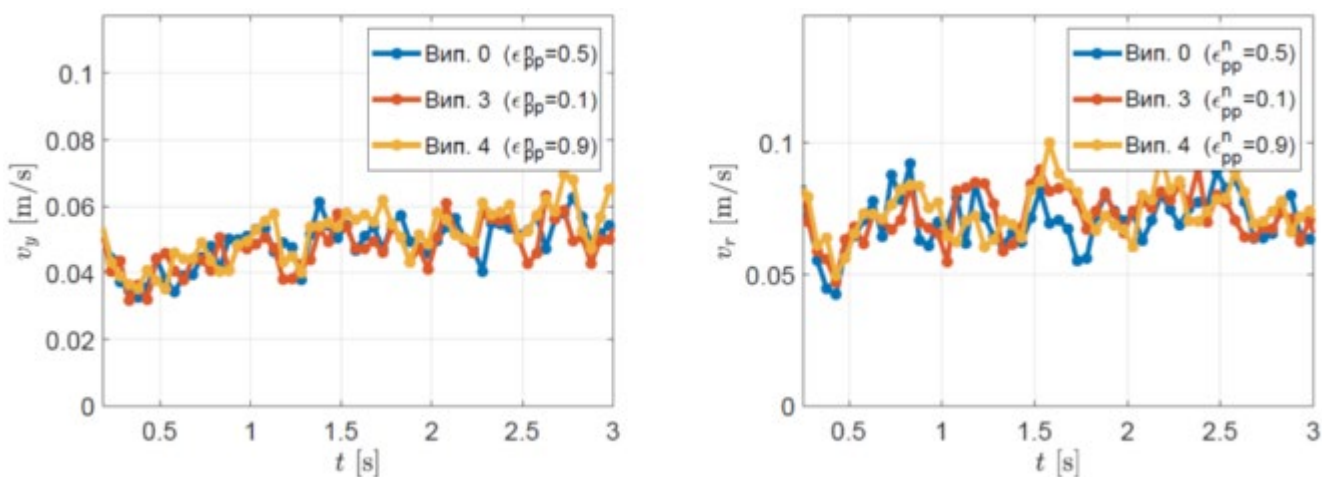
Таблиця 4.2 – Умови моделювання для аналізу чутливості до коефіцієнта відновлення з 50% заповненням об'ємом і швидкістю обертання 60 об/хв

	Вид	ϵ^n	μ^s [-]	μ^{ro} [-]	μ^{to} [-]
Випадок 0	всі	0,5	0,5	0,5	0,5
Випадок 1	всі	0,1	0,5	0,5	0,5
Випадок 2	всі	0,9	0,5	0,5	0,5
Випадок 3	0-1, 0-2	0,5	0,5	0,5	0,5
	1-1, 2-2, 1-2	0,1			
Випадок 4	0-1, 0-2	0,5	0,5	0,5	0,5
	1-1, 2-2, 1-2	0,9			
Випадок 5	0-1, 0-2	0,1	0,5	0,5	0,5
	1-1, 2-2, 1-2	0,5			
Випадок 6	0-1, 0-2	0,9	0,5	0,5	0,5
	1-1, 2-2, 1-2	0,5			

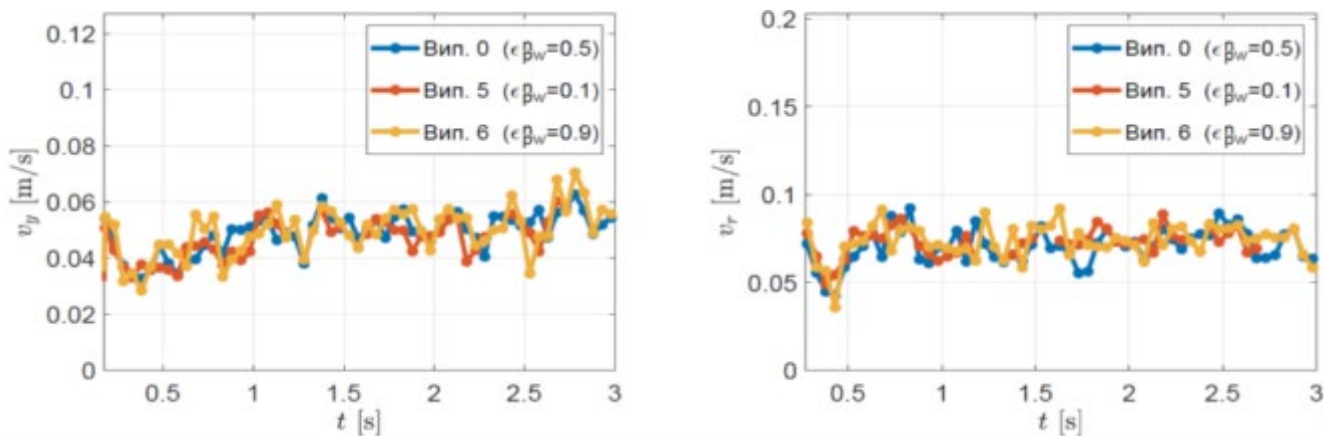
Графіки на рисунку 4.5 показують середні осьові (ліворуч) і вихрові (праворуч) швидкості для різних значень ϵ^n . Хоча графіки в цілому мають однакову тенденцію, можна помітити, що середня швидкість трохи вища для зростаючих значень коефіцієнта відновлення. Цей результат був очікуваним, оскільки високий коефіцієнт відновлення передбачає низьке енергетичне розсіювання після кожного зіткнення.



(а) Коefіцієнт відновлення



(б) Коefіцієнт відновлення між частинками



(в) Коefіцієнт відновлення між частинкою і стінкою

Рисунок 4.5 – Вплив (а) коefіцієнта відновлення, (б) коefіцієнта відновлення між частинками та (с) коefіцієнта відновлення між частинками і стінками на середню осьову швидкість і середню вихрову швидкість для $\Omega = 60$ об/хв

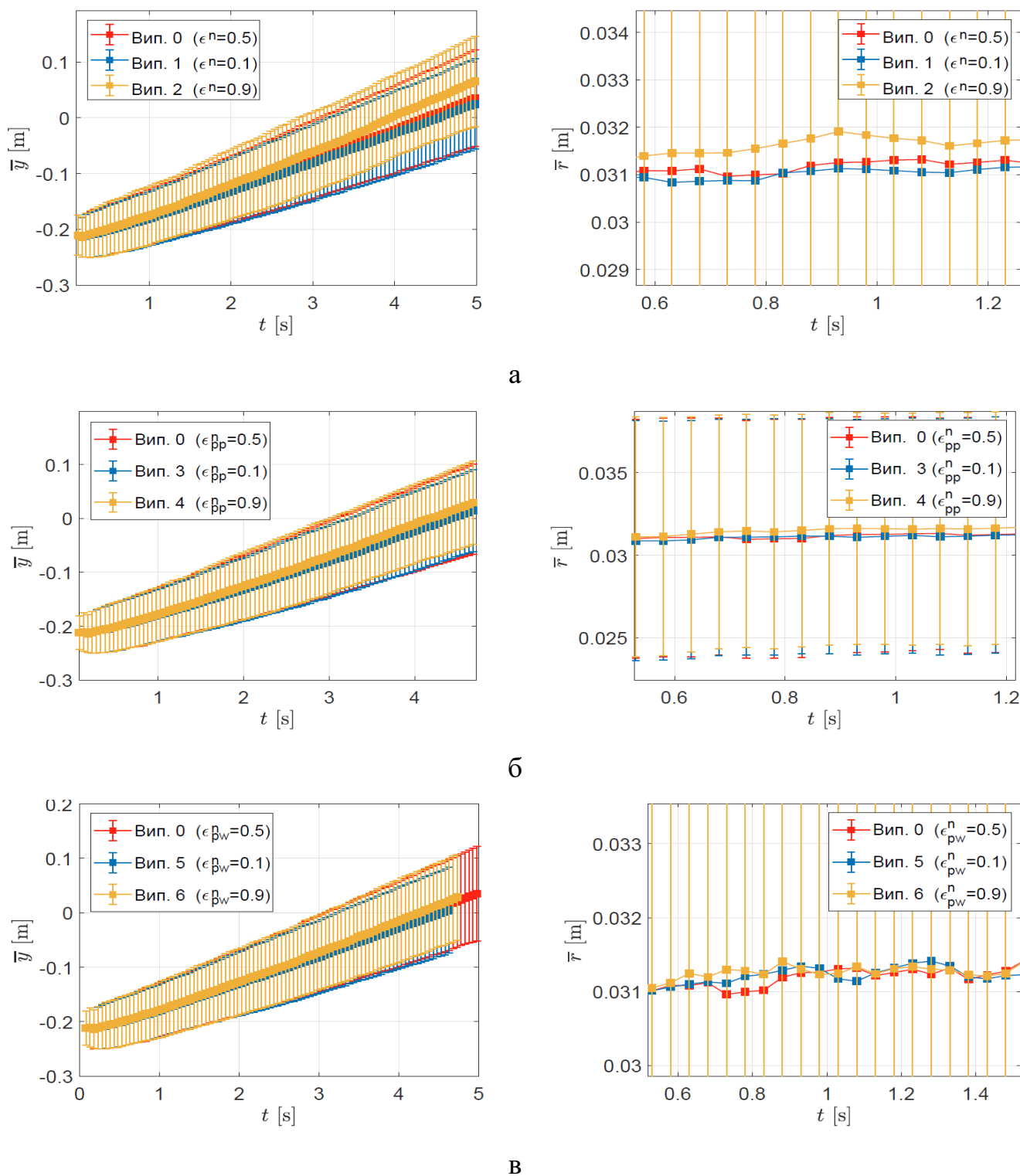


Рисунок 4.6 – Вплив (а) коефіцієнта відновлення, (б) коефіцієнта відновлення між частинками та (в) коефіцієнта відновлення між частинками і стінками на середню осьову позицію (ліворуч) та середню радіальну позицію (праворуч) частинок для 60 об/хв., з вертикальними лініями, що представляють стандартне відхилення

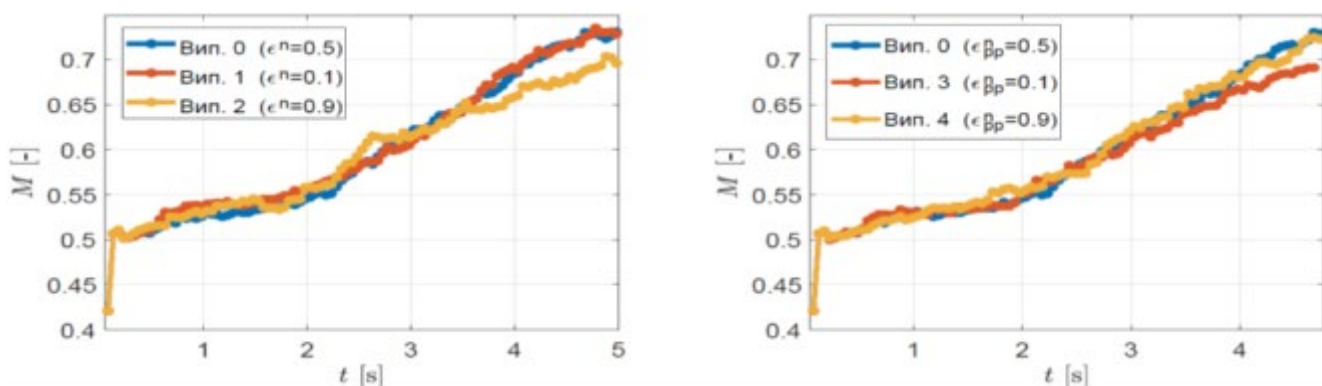
Середні осьові та (збільшені) радіальні позиційні профілі показані на рисунку 4.6. З рисунка 4.6 видно, що вплив коефіцієнта відновлення стає більш домінуючим при вищих значеннях, оскільки профілі $\epsilon^n = 0,1$ і $\epsilon^n = 0,5$ відносно близькі один до одного в порівнянні з профілем $\epsilon^n = 0,9$. Порівнюючи рисунок 4.6, значної різниці не спостерігається.

Індекси змішування відображені для кожного випадку на рисунку 4.7. Кожен графік показує, що індекс змішування слабо піддається впливу коефіцієнта відновлення. На першому графіку індекс змішування найбільш змінюється при високому ϵ^n , тоді як для нижчих значень він залишається незмінним. На другому та третьому графіках відмінності менш значущі.

Наступний набір аналізів проводиться для оцінки впливу когезії між частками. Капілярна когезійна сила на частку визначається різними факторами: об'ємом рідкого мосту V_{ij}^b , кутом контакту θ_{ij}^{eff} , поверхневим натягом σ та розміром часток, з'єднаних мостом, a_{ij}^{eff} . У розділі 2 обговорювалося, що сила когезії зазвичай виражається в термінах числа Бонда, яке в цьому випадку є відношенням сили рідкого мосту до ваги частки. У випадках, наведених у таблиці 4.3, когезійна капілярна сила (а отже, число Бонда) варіюється зміною поверхневого натягу при збереженні інших параметрів сталими. Рідкий об'єм, що призначається кожній частці, визначається співвідношенням води до компоненту $w=s$, яке вимірюється шляхом зважування певної кількості спочатку вологого компоненту корма до та після нагрівання, щоб дозволити воді, що застрягла в матеріалі, випаруватися.

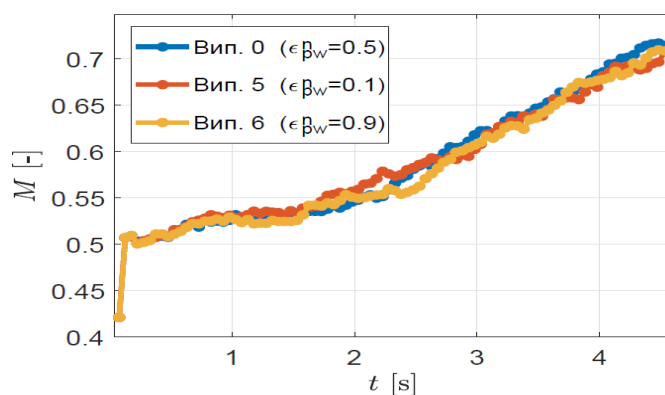
При $w = s = 0,029$, рідка маса та об'єм виводяться, а кількість рідини рівномірно розподіляється між усіма піщаними частками. Випадок 0 відповідає нульовій когезії. Випадки 1, 2 і 3 просто використовують високі, низькі та дуже високі значення для поверхневого натягу відповідно. Оскільки щільність часток різна, число Бонда також дещо різне для цих двох видів. Обидва числа Бонда, відповідні обраному значенню поверхневого натягу, представлені. У всіх

симуляціях коефіцієнти дисипації підтримуються на номінальних значеннях 0.5, а кількість часток залишається сталою, так що заповнювальна частка становить приблизно 0.5. Впуск рідини в частки встановлений на нуль.



а

б



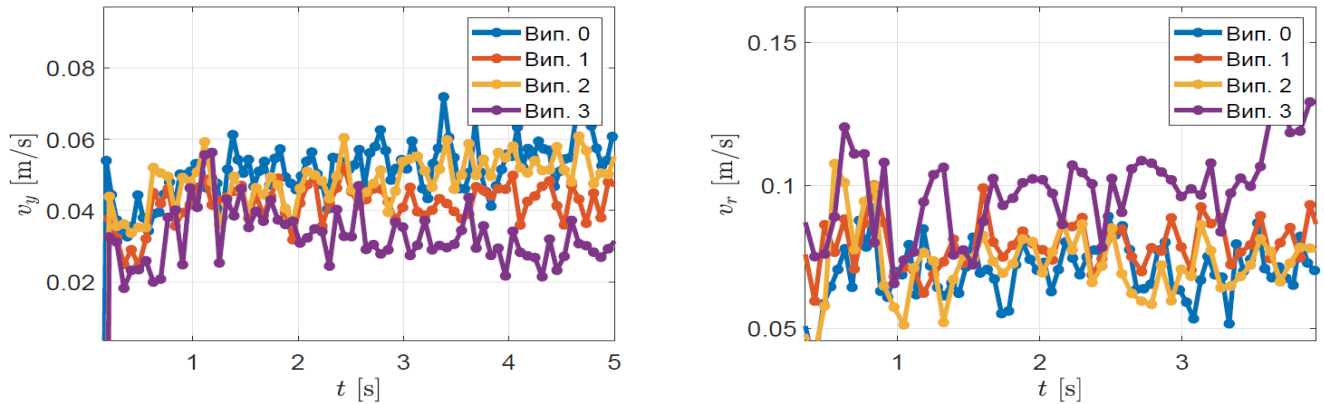
в

Рисунок 4.7 – Вплив (а) коефіцієнта відновлення, (б) коефіцієнта відновлення між частками та (в) коефіцієнта відновлення частка-стінка на індекс змішування для 60 об/хв

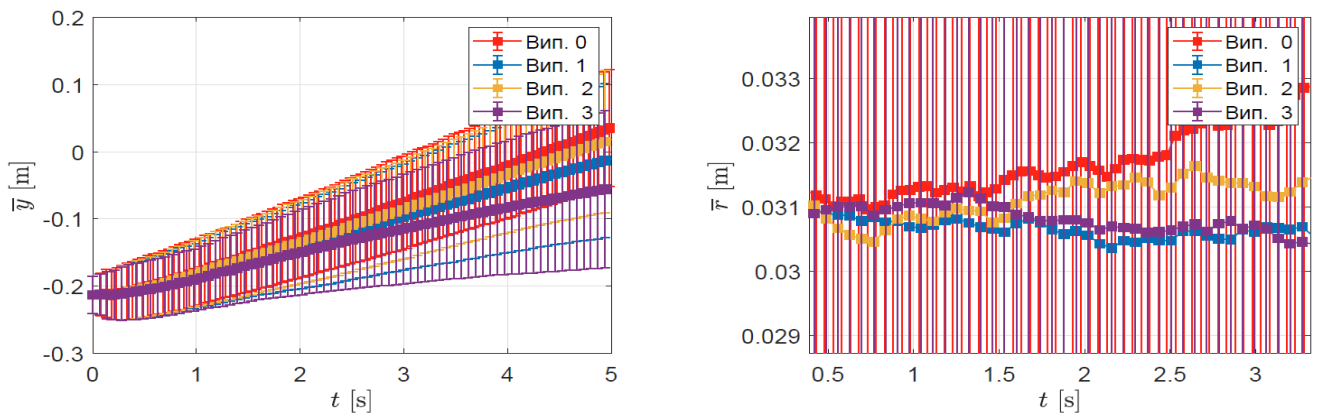
Таблиця 4.3 – Умови моделювання для аналізу чутливості когезії при 50% заповнювального обсягу та швидкості обертання = 60 об/хв

	Вид	σ	$V_{Lmin} [M^3]$	$\epsilon^n; \mu^v [-]$
Випадок 0	усі	0,0 ($B_o = 0$)	0,0	0,0
Випадок 1	усі	0,7 ($B_o = 5,6-7,7$)	0,0	0,0
Випадок 2	усі	0,07 ($B_o = 0,56-0,77$)	0,0	0,0
Випадок 3	усі	7 ($B_o = 56-77$)	0,0	0,0

Спочатку ми аналізуємо вплив сили когезії. Середні осьові та радіальні профілі швидкості для перших чотирьох випадків показані на рисунку 4.8.



(а) Профілі швидкості частинок



(b) Профілі положення частинок

Рисунок 4.8 – Вплив сили зчеплення на (а) середні швидкості частинок та (b) середні положення частинок при 60 об/хв

Можна помітити, що сила когезії має чіткий вплив на швидкість потоку. Коли рівень когезії зменшується, осьова швидкість збільшується, оскільки частки можуть вільно текти. Середня радіальна швидкість вища при збільшенні когезії, оскільки з'єднані частки обертаються колективно, тобто більше часток обертається в порівнянні з низьким рівнем когезії, як показано на рисунку 4.9.

Дивлячись на середні профілі позицій на рисунку 4.8, очевидно, що матеріал передається швидше в осьовому напрямку при зменшенні рівнів когезії, що вже очікувалося, і це також видно з рисунка 4.9, де знімки зроблені в $t \approx 3.97$ с для

низької, високої та дуже високої когезії. Середня радіальна позиція, зменшується для високих рівнів когезії, оскільки частки згруппуються разом. Рисунок 4.10 показує знімки потоку для випадків 1-3. Формування великих агломератів при високій когезії видно.

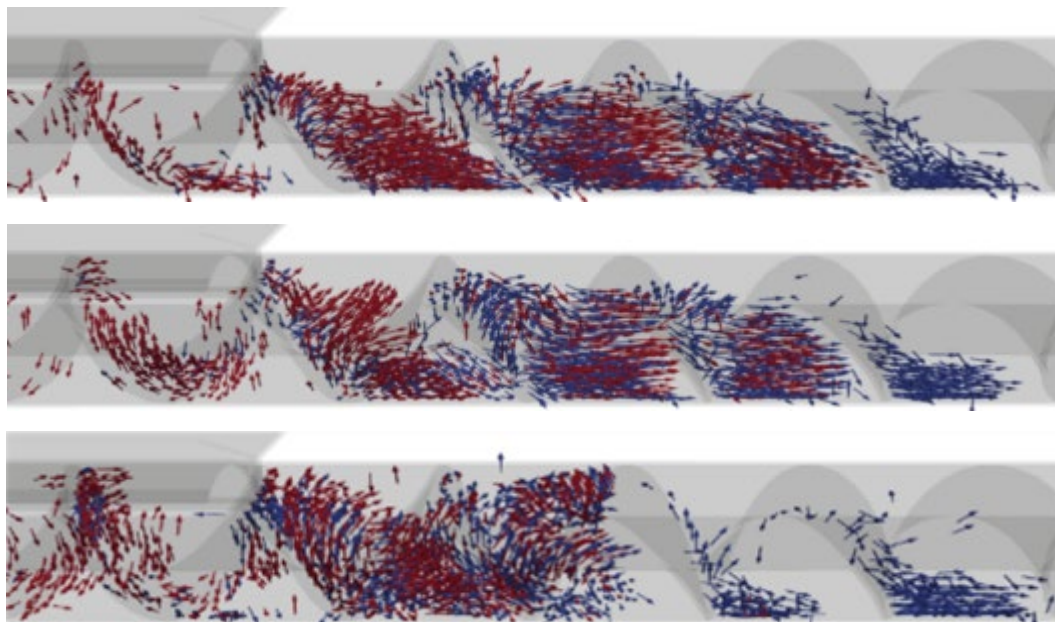


Рисунок 4.9 – Вплив сили зчеплення на швидкісне поле для низького зчеплення (випадок 2), високого зчеплення (випадок 1) та дуже високого зчеплення (випадок 3) зверху вниз; знімки потоку в момент часу $t \approx 3.97$ с

Ступінь змішування для всіх випадків показана на наступному малюнку. Профілі чітко демонструють, що частинки стають менш змішаними в міру збільшення зчеплення в цій системі. Це вказує на те, що агломеровані матеріали, які утворюються при сильному зчепленні, не розбиваються ефективно змішувальним гвинтом. Натомість агломеровані частинки схильні колективно обертатися в напрямку виходу з гвинта. Цікаво, що індекс змішування для $B_0 = 56-77$ трохи вищий, ніж індекс, що відповідає $B_0 = 5.6-7.7$.

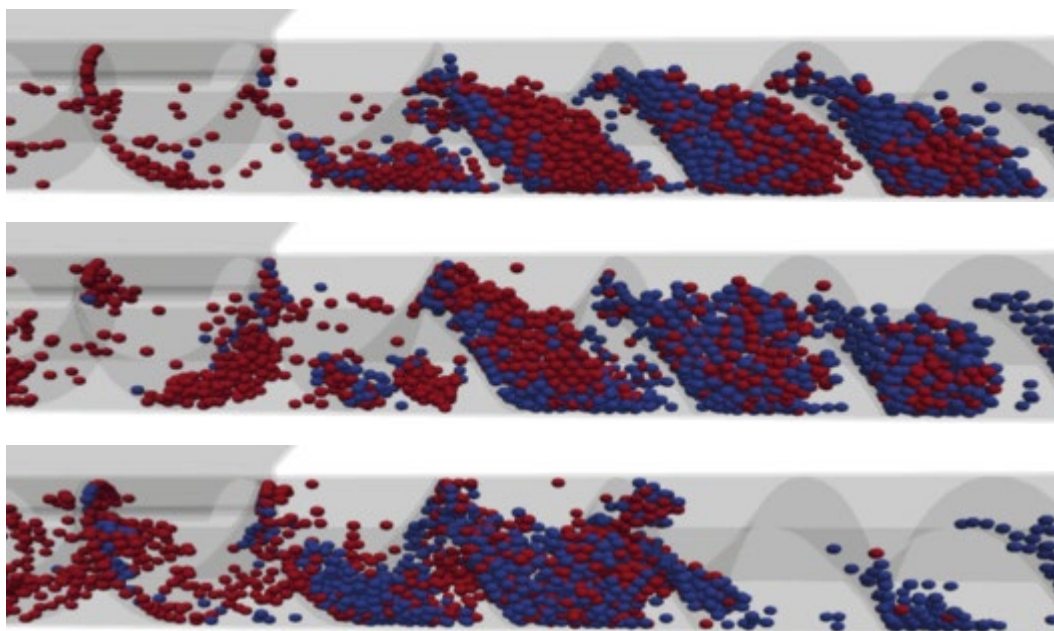


Рисунок 4.10 – Потік частинок для низького зчеплення (випадок 2), високого зчеплення (випадок 1) та дуже високого зчеплення (випадок 3) зверху донизу; знімки потоку в момент часу $t \approx 4.94$ с

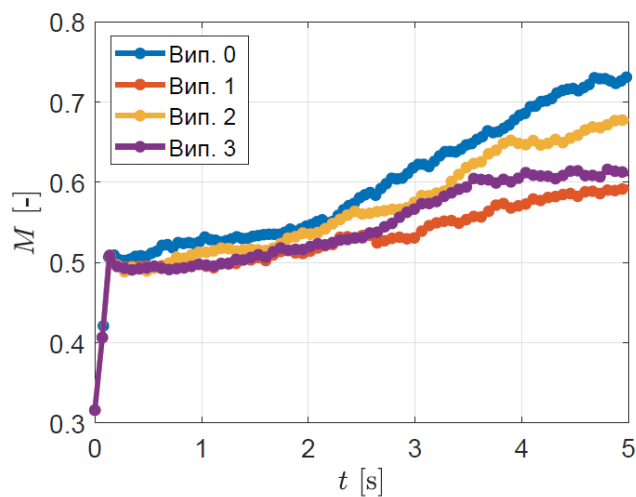


Рисунок 4.11 – Вплив сили зчеплення на індекс змішування для 60 об/хв

4.3 Вплив геометрії змішувача

Було проведено кілька аналізів чутливості для вивчення впливу параметрів

моделі на поведінку потоку та індекс змішування. З літературного огляду, відомо, що геометрія змішувача також впливає на потік у шнековому конвеєрі. Наприклад, додавання додаткових елементів до шнека призводить до подовження шляхів транспортування та збільшення швидкостей сухих частинок всередині конвеєра, що може призвести до поліпшеного змішування. Одним із модифікованих дизайнів у їх дослідженні є шнек із додатковою (прямою) смугою, вирівняною зі стержнем шнека. Подібну модель було розроблено (рисунок 4.12), і вона буде використана для оцінки, чи дійсно модифікований дизайн призводить до вищих швидкостей і поліпшеного змішування. Симуляції виконуються для вологих частинок з різними рівнями когезії, як показано в таблиці 4.4. Кожне дослідження випадку проводиться з використанням оригінального та модифікованого дизайну, і результати порівнюються таким чином.



Рисунок 4.12 – Модифікований шнек, подібний до дизайну, який, як очікується, покращить змішування

Таблиця 4.4 – Умови моделювання для аналізу чутливості до когезії з 50% заповненням об'єму та швидкістю обертання 60 об/хв.

	Вид	σ	$V_{Lsand} [M^3]$	$\epsilon^n; \mu^v [-]$
Випадок 1	усі	1 ($B_o = 8,1-11,6$)	0,0	0,5
Випадок 2	усі	7 ($B_o = 56-77$)	0,0	0,5

Рисунок 4.12 показує результати потоку та змішування нового дизайну шнека в порівнянні з оригінальним дизайном для випадку 1. Перший графік показує, що час затримки матеріалу практично однаковий для обох дизайнів, тоді як графіки середньої швидкості виявляють, що радіальна швидкість значно

збільшена для модифікованого дизайну шнека. Останній графік показує значне збільшення індексу змішування при використанні модифікованого шнека. Рисунок 4.13 показує знімки потоку для оригінального дизайну (вгорі) та модифікованого дизайну (внизу).

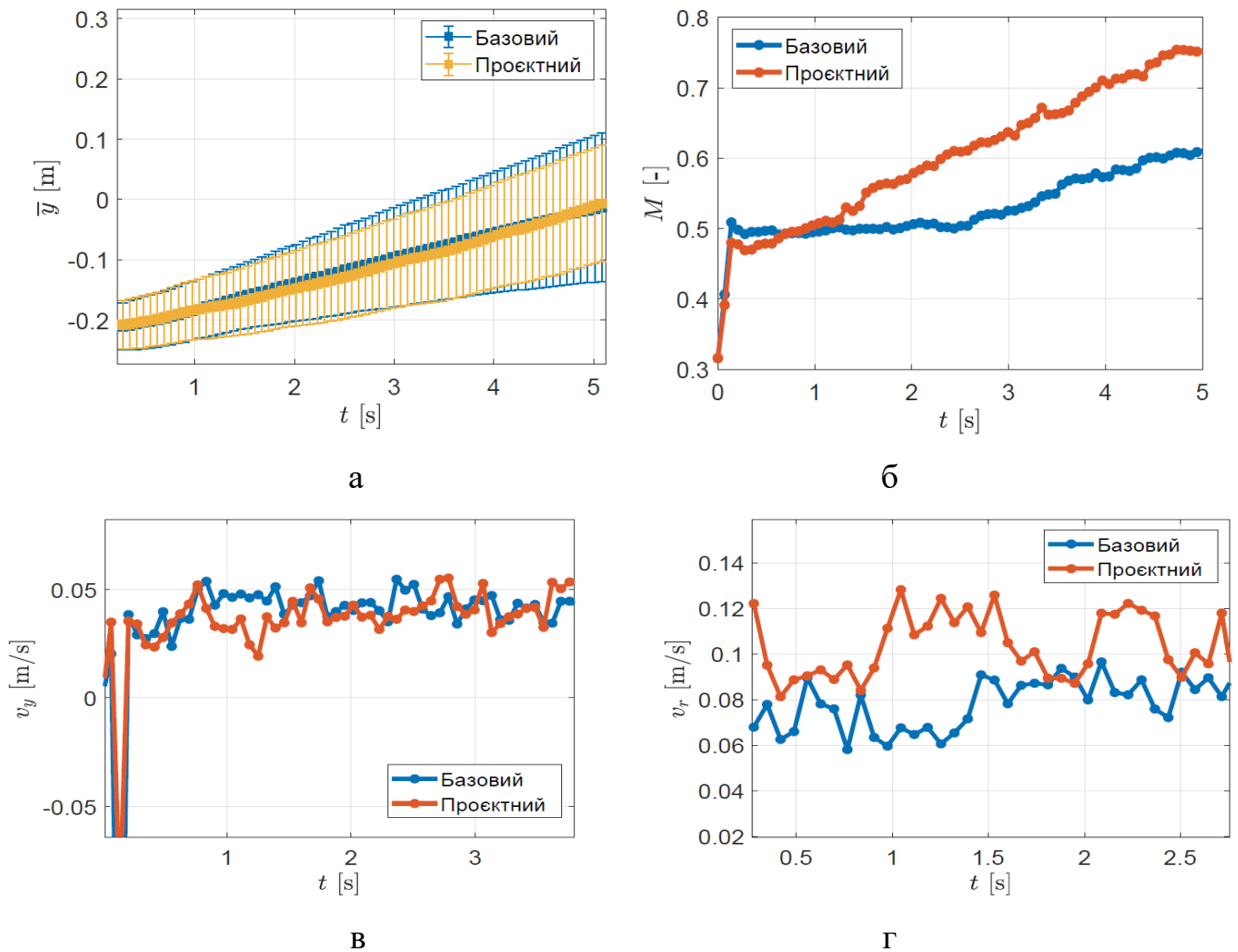


Рисунок 4.13 – Вплив дизайну шнека на (а) середню осьову позицію частинок, (в) середню осьову швидкість частинок, (г) середню радіальну швидкість частинок та (б) індекс змішування для випадку 1 при 60 об./хв

Рисунок 4.15 показує результати для випадка 2. Поведінка потоку значно відрізняється від випадка 1.

Час перебування частинок більше не є постійним; матеріал рухається значно

повільніше в конвеєрі з модифікованим шнеком. Також індекс змішування швидше зростає при використанні модифікованого дизайну, але вресіті-решт досягає приблизно того ж значення, що й для оригінального дизайну. Це вказує на те, що якщо когезія стає дуже сильною, то модифікована геометрія рисунка 4.12 не робить суттєвої різниці, і потрібно розглянути інші варіанти. Рисунок 4.16 показує знімки потоку для оригінального дизайну (вгорі) та модифікованого дизайну (внизу).

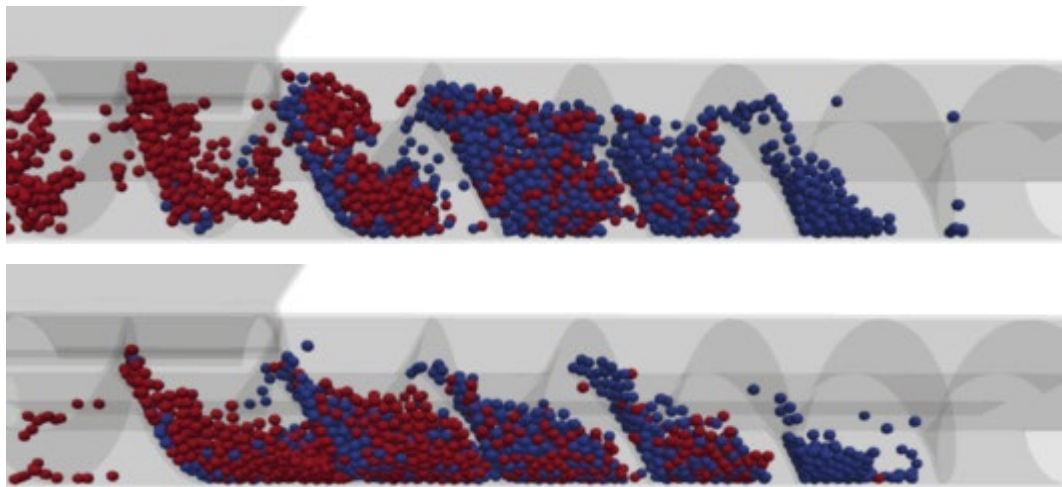


Рисунок 4.14 – Потік частинок із використанням оригінального дизайну (зверху) та модифікованого дизайну (знизу) для випадку 1; знімки потоку при $t \approx 3,97$ с

Остання частина цього дослідження представляє два приклади, в яких використовується модифікований дизайн ротора (з попереднього дослідження в літературі) для оцінки того, як змінюється потік та поведінка змішування вологого матеріалу. Літературне дослідження показує, що конкретний модифікований дизайн покращує процес змішування сухих, вільноплинних матеріалів.

У цьому дослідженні спостерігається, що середня радіальна швидкість зростає, і до певної міри відбувається краще змішування при використанні модифікованого дизайну. Для дуже високих чисел Бонда індекс змішування не

покращується значною мірою при використанні цього нового дизайну. Хоча можливі багато інших варіантів дизайну, які можна дослідити далі, метою цих двох прикладів було показати, як можна використовувати модель для переосмислення геометрії змішувача за умови наявності точних властивостей матеріалу.

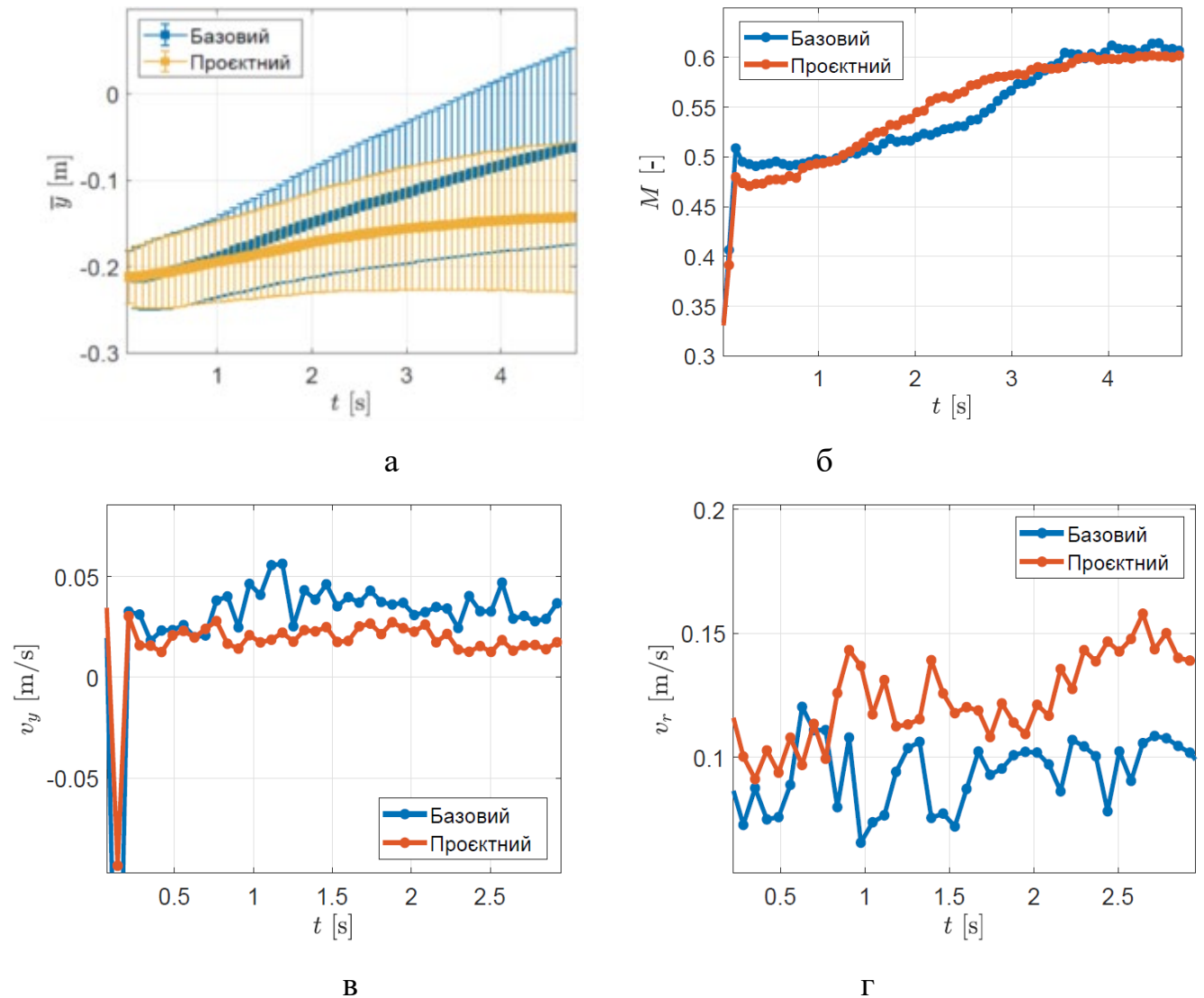


Рисунок 4.15 – Вплив дизайну шнека на (а) середнє осьове положення частинок, (в) середню осьову швидкість частинок, (г) середню радіальну швидкість частинок і (б) індекс змішування для випадку 2 при частоті обертання 60 об/хв

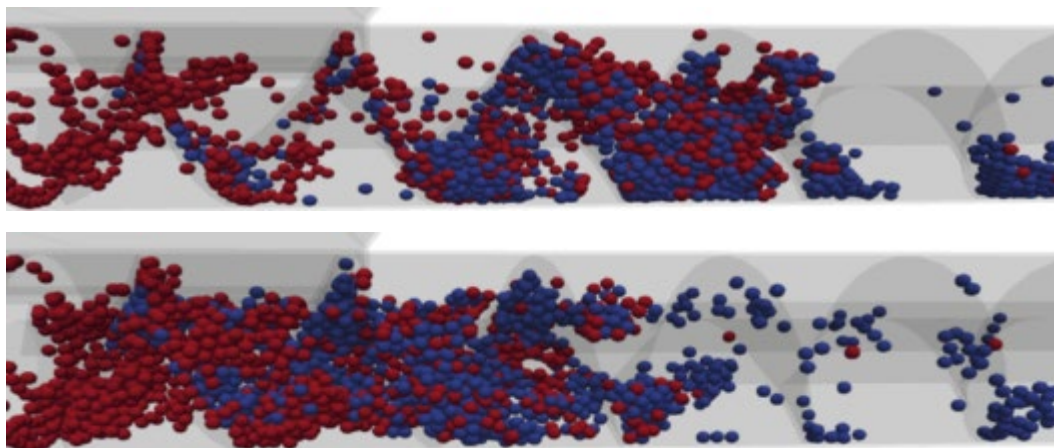


Рисунок 4.16 – Потік частинок із використанням оригінального дизайну (зверху) та модифікованого дизайну (знизу) для випадку 2; знімки потоку при $t = 4.73$ с

4.5 Висновки з розділу

1. Було встановлено, що збільшення кількості частинок у симуляції, завдяки зменшенню їх розміру, дозволяє отримати більш точні профілі швидкостей. Аналіз впливу тертя показав, що ковзне тертя має вирішальне значення для змішування, сприяючи рециркуляції частинок. Водночас тертя кочення та кручення мають незначний вплив, а коефіцієнт відновлення майже не впливає на поведінку змішування.

2. Сили зчеплення значно впливають на рух матеріалу в осьовому напрямку, уповільнюючи його, та сприяють радіальному транспортуванню частинок. Проте, зі збільшенням зчеплення індекс змішування зменшується, вказуючи на недостатню ефективність простого дизайну шнека у руйнуванні агломератів. Модифікований дизайн ротора покращує радіальну швидкість і змішування для матеріалів з низькою або середньою силою зчеплення, проте при дуже високих значеннях зчеплення його ефективність знижується.

5 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях в Україні регулюється *різноманітними нормативними актами*, які визначають вимоги до безпеки праці, заходи для запобігання нещасним випадкам, а також дії у випадках надзвичайних ситуацій. Основні документи включають:

1. Конституція України: Стаття 43 гарантує право на безпечні і здорові умови праці;

2. Законодавство: Закон України "Про охорону праці" — основний нормативно-правовий акт, який регулює відносини в сфері охорони праці, визначає права та обов'язки працівників і роботодавців; Закон України "Про цивільний захист" — регулює питання запобігання та ліквідації надзвичайних ситуацій, а також забезпечення безпеки населення;

3. Кодекс законів про працю України: включає загальні вимоги до охорони праці на підприємствах, регулює питання забезпечення безпечних умов праці.

4. Постанови та накази:

- Постанова Кабінету Міністрів України "Про затвердження Положення про державний нагляд і контроль за охороною праці" — визначає порядок здійснення державного нагляду за дотриманням законодавства з охорони праці.

- Наказ Міністерства охорони здоров'я України "Про затвердження Інструкції з охорони праці" — встановлює вимоги щодо забезпечення безпеки праці на підприємствах.

5. Нормативні документи:

- Державні санітарні правила та норми — регулюють питання безпеки праці в певних галузях.

- Державні будівельні норми — визначають вимоги до безпеки будівельних і монтажних робіт.

6. Методичні рекомендації та інструкції

- Розробляються на рівні підприємств для специфічних умов праці і надзвичайних ситуацій, містять заходи щодо забезпечення безпеки.

7. Міжнародні норми та стандарти

- Україна також дотримується норм і стандартів, встановлених міжнародними організаціями, такими як Міжнародна організація праці (МОП).

Забезпечення охорони праці та безпеки в надзвичайних ситуаціях є важливим аспектом діяльності в Україні. Нормативна база, яка регулює ці питання, постійно оновлюється, щоб відповідати сучасним вимогам та міжнародним стандартам.

Виробництво зволжених кормів з рослинної сировини є важливим етапом у сільськогосподарському виробництві, що вимагає дотримання певних норм охорони праці та безпеки. Під час технологічного процесу існують численні ризики, які можуть призвести до травм працівників, матеріальних втрат або навіть надзвичайних ситуацій. Тому важливо забезпечити ефективні заходи для запобігання цим небезпекам.

Основні ризики на виробництві.

Механічні ризики: Оскільки у виробництві використовуються різні механізми, такі як подрібнювачі, змішувачі та пресувальні установки, існує ймовірність травмування працівників через порушення правил експлуатації машин. Вони можуть стати причиною отримання механічних травм, порізів або удушення.

Електричні ризики: Неправильне використання електричних пристроїв, відсутність заземлення або проблеми з електромережею можуть призвести до електротравм, ураження електричним струмом або навіть пожежі.

Хімічні ризики: У процесі виробництва можуть використовуватися різні хімічні речовини, такі як добавки для покращення якості кормів. Неправильне їх

зберігання або використання може призвести до отруєнь, алергічних реакцій або навіть вибухів.

Психофізіологічні ризики: Довготривала праця у стресових умовах, перевантаження або монотонність роботи можуть призвести до втоми, зниження продуктивності та підвищення ймовірності нещасних випадків.

Ризики пожежі: Наявність легкозаймистих матеріалів (наприклад, зволожена рослинна сировина) та порушення правил пожежної безпеки можуть призвести до виникнення пожежі.

Можливі надзвичайні ситуації.

Пожежа: Як уже зазначалося, легкозаймисті матеріали та недотримання правил можуть стати причинами виникнення пожежі. Надзвичайна ситуація може виникнути під час загоряння або вибуху, що може призвести до серйозних травм працівників.

Вибух: Використання хімічних речовин або невірні технологічні процеси можуть призвести до вибухів, що загрожує життю працівників та матеріальним ресурсам.

Нещасні випадки: Механічні травми можуть статися під час експлуатації обладнання, наприклад, при потраплянні частин тіла в рухомі елементи машин.

Отруєння: Неправильне використання хімікатів може викликати отруєння працівників, що призведе до серйозних наслідків для їхнього здоров'я.

Шляхи вирішення проблем безпеки.

Оцінка ризиків: Необхідно провести регулярну оцінку ризиків на виробництві, щоб визначити потенційні небезпеки та розробити плани їх усунення.

Навчання працівників: Всі працівники повинні проходити навчання з охорони праці, включаючи інструктажі з безпечного використання обладнання, поводження з хімікатами та надання першої допомоги.

Контроль за технічним станом обладнання: Регулярне обслуговування і перевірка стану машин допоможуть знизити ризики механічних травм. Обладнання повинно бути оснащено захисними елементами.

Впровадження стандартів охорони праці: Розробка та впровадження внутрішніх нормативних документів з охорони праці, які визначають вимоги до безпеки на виробництві.

Система реагування на надзвичайні ситуації: Створення плану дій на випадок надзвичайних ситуацій, включаючи евакуацію працівників, забезпечення засобів пожежогасіння та надання першої допомоги.

Моніторинг умов праці: Регулярні перевірки робочих місць для виявлення небезпечних умов праці, а також впровадження системи контролю за якістю повітря, шумом і освітленістю.

Забезпечення охорони праці та безпеки в цеху по виробництву зволжених кормів з рослинної сировини є ключовим аспектом, що вимагає комплексного підходу. Ідентифікація ризиків, навчання працівників, регулярний моніторинг і впровадження стандартів безпеки можуть суттєво знизити ймовірність виникнення небезпечних ситуацій. Тільки завдяки спільним зусиллям усіх учасників процесу можна забезпечити безпечну та ефективну роботу цеху, що, у свою чергу, сприятиме підвищенню продуктивності та якості виробництва.

6 ЕКОНОМІЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ ЗМІШУВАЧА ВОЛОГИХ КОРМІВ

Розроблений змішувач завдяки компактності конструкції є оптимальним рішенням для застосування в процесі багатоступінчастого виготовлення сипучих кормів, зокрема, при підготовці преміксів. Важливим етапом аналізу його ефективності є порівняння з найближчим аналогом за призначенням, що дозволяє зосередитися на функціональних та економічних аспектах. Порівняння ґрунтуватиметься на розрахунках питомих експлуатаційних витрат у гривнях за одну тону готової продукції, без прив'язки до обсягів виробництва, при одно- або двозмінній роботі. Для проведення розрахунків використано початкові дані, наведені в таблиці 6.1.

Таблиця 6.1 – Вихідні дані

Показник	Устаткування	
	базове	розроблене
Потужність, кВт	2,2	2,2
Продуктивність, т/год	1,125	1,8
Обслуговуючий персонал, люд.	1	1
Строк служби, років	10	10
Тривалість зміни, год.	8	8
Коефіцієнт відрахувань на ТО та ремонт	0,14	0,14
Коефіцієнт амортизаційних відрахувань	0,1	0,11
Капітальні вкладення, грн.	-	40 500
Балансова вартість, грн.	50 000	-

Розрахунок витрат на виплату заробітної плати $P_z = Q \cdot n \cdot f \cdot \delta$, де: n – чисельність обслуговуючого персоналу, люд.; f – тарифна ставка одного робітника за годину, грн./год.; δ – коефіцієнт нарахування на заробітну плату (1,22); Q – продуктивність змішувача, т/год.

Для стандартного змішувача: $P_z = 1 \cdot 40,46 \cdot 1,221,125 = 43,88$ грн/т.

Для розробленого змішувача: $P_z = 1 \cdot 40,46 \cdot 1,221,8 = 27,42$ грн/т.

Розрахунок витрат на електроенергію: $P_e = QN \cdot c_e$, де: N – потужність двигуна змішувача, кВт; c_e – вартість електроенергії, грн./кВт·год (2,64 грн./кВт·год); Q – продуктивність змішувача, т/год. Для стандартного змішувача: $P_e = 2,2 \cdot 2,641,125 = 5,16$ грн/т. Для розробленого змішувача: $P_e = 2,2 \cdot 2,641,8 = 3,23$ грн/т.

Розрахунок амортизаційних відрахувань: $P_a = Q \cdot \alpha \cdot V \cdot K$, де: α – коефіцієнт амортизації (0,1 для стандартного та 0,11 для розробленого змішувача); V – балансова вартість змішувача, грн; K – коефіцієнт використання змішувача; Q – продуктивність змішувача, т/год.

Для стандартного змішувача: $P_a = 0,1 \cdot 50000 \cdot 0,000341,125 = 1,51$ грн/т.

Для розробленого змішувача: $P_a = 0,1 \cdot 40500 \cdot 0,000341,8 = 0,77$ грн/т.

Розрахунок витрат на технічне обслуговування і ремонт: $P_r = Q \cdot \beta \cdot V \cdot K$, де: β – коефіцієнт відрахувань на ремонт (0,14); V – балансова вартість змішувача, грн.; K – коефіцієнт використання змішувача; Q – продуктивність змішувача, т/год.

Для стандартного змішувача: $P_r = 0,14 \cdot 50000 \cdot 0,000341,125 = 2,12$ грн/т.

Для розробленого змішувача: $P_r = 0,14 \cdot 40500 \cdot 0,000341,8 = 1,07$ грн/т.

Загальні експлуатаційні витрати: $P = P_z + P_a + P_r + P_e$.

Для стандартного змішувача: $P = 43,88 + 1,51 + 2,12 + 5,16 = 52,67$ грн/т.

Для розробленого змішувача: $P = 27,42 + 0,77 + 1,07 + 3,23 = 32,49$ грн/т.

Економія витрат: $E = P_6 - P_n = 52,67 - 32,49 = 20,18$ грн/т.

Термін окупності: $T = P \cdot E_c \cdot V_c$, де: V_c – капітальні вкладення, грн.; P – обсяг робіт за рік, т.; E_c – економія витрат на одиницю продукції, грн/т.

Обсяг робіт для розробленого змішувача при завантаженні 70 %:
 $P = 1,8 \cdot 0,9 \cdot 8 \cdot 365 \cdot 70 / 100 = 3311$ т.

Термін окупності: $T = 40500 / (3311 \cdot 20,18) = 0,606$ роки.

Загалом, модернізація змішувача дозволяє значно знизити експлуатаційні витрати, підвищити економічну ефективність виробництва, та окупити інвестиції у найкоротші терміни, що робить дане рішення вигідним для впровадження в практику.

ВИСНОВКИ

1. Перспективним напрямком розвитку вологої годівлі тварин в українських господарствах є впровадження кормосумішей на основі бобово-злакових культур та побічних продуктів промисловості, що дозволяє знизити витрати на комбікорми та забезпечити збалансоване харчування. Використання гвинтових змішувачів в даному процесі є оптимальним рішенням, завдяки їх високій ефективності, енергоощадності та адаптивності до вологих компонентів.

2. Для ефективного моделювання процесу змішування частинок у змішувачі необхідно враховувати різні типи взаємодій між сухими та вологими частинками, включаючи сили відштовхування та когезійні сили через рідинні мости. Використання методу дискретних елементів (DEM) дозволяє точно моделювати ці взаємодії та досягати високої точності у визначенні траєкторій частинок, забезпечуючи стабільність числового моделювання при правильному виборі кроку часу.

3. Було встановлено, що збільшення кількості частинок у симуляції, завдяки зменшенню їх розміру, дозволяє отримати більш точні профілі швидкостей. Аналіз впливу тертя показав, що тертя ковзання має вирішальне значення для змішування, сприяючи рециркуляції частинок. Водночас тертя кочення та кручення мають незначний вплив, а коефіцієнт відновлення майже не впливає на поведінку змішування.

4. Сили зчеплення значно впливають на рух матеріалу в осьовому напрямку, уповільнюючи його, та сприяють радіальному транспортуванню частинок. Проте, зі збільшенням зчеплення індекс змішування зменшується, вказуючи на недостатню ефективність простого дизайну шнека у руйнуванні агломератів. Удосконалена конструкція гвинта змішувача підвищує радіальну швидкість і індекс змішування для матеріалів з низькою або середньою силою

зчеплення, проте при дуже високих значеннях зчеплення його ефективність знижується.

5. Забезпечення охорони праці та безпеки в цехі по виробництву зволжених кормів з рослинної сировини є ключовим аспектом, що вимагає комплексного підходу. Ідентифікація ризиків, навчання працівників, регулярний моніторинг і впровадження стандартів безпеки можуть суттєво знизити ймовірність виникнення небезпечних ситуацій. Тільки завдяки спільним зусиллям усіх учасників процесу можна забезпечити безпечну та ефективну роботу цеху, що, у свою чергу, сприятиме підвищенню продуктивності та якості виробництва.

6. Порівняльний аналіз удосконаленого змішувача із базовим показав, що експлуатаційні витрати для удосконаленого змішувача становлять 32,49 грн/т, що на 20,18 грн/т менше, ніж у стандартного змішувача (52,67 грн/т). Економія витрат на одиницю продукції сприяє швидкій окупності інвестицій у новий змішувач, яка становить лише 0,606 року при завантаженні обладнання на 70%. Це робить удосконалення змішувача не тільки технічно, але й економічно обґрунтованою, забезпечуючи підвищену рентабельність виробництва та скорочення експлуатаційних витрат.

Бібліографія

1. Алієв, Е. Б. (2023). Чисельне моделювання процесів агропромислового виробництва: підручник. Київ: Аграрна наука. ISBN 978-966-540-584-9. <https://doi.org/10.31073/978-966-540-584-9>
2. Алієв, Е. Б., Миколенко, С. Ю., Сова, Н. А., та ін. (2022). Техніко-технологічне забезпечення безвідходної переробки зернової сировини у харчові продукти і корми: колективна монографія (за заг. ред. Е. Б. Алієва). Дніпро: ЛІРА. ISBN 978-966-981-687-0.
3. Aliiev, E., Maliehin, R., Ivliev, V., & Aliieva, O. (2021). Simulation of the process of cavitation treatment of liquid feed [Техніко-технологічне забезпечення комплексної безвідходної переробки рослинної сировини олійних культур у корми для органічного тваринництва]. *Scientific Horizons*, 24(2), 16-26. [https://doi.org/10.48077/scihor.24\(2\).2021.16-26](https://doi.org/10.48077/scihor.24(2).2021.16-26)
4. Шевченко, І. А., Алієв, Е. Б., & Доруда, С. О. (2013). Моделювання процесу потокового змішування кормосумішей з використанням методу дискретних елементів. *Механізація та електрифікація сільського господарства*, (97), 536-544.
5. Доруда, С. А., & Алієв, Е. Б. (2013). Усовершенствование конструктивно-технологической схемы смесителя-кормораздатчика потокового типа. У *Материалы Международной научно-практической конференции* (с. 260-263). Минск: БГАТУ.
6. Шевченко, І. А., Алієв, Е. Б., & Доруда, С. О. (2013). Результати моделювання процесу потокового змішування кормосумішей змішувачем-кормороздавачем. *Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин*, (43, частина 1), 202-207.
7. Січкарь, А. В., Алієв, Е. Б., & Лиходід, В. В. (2015). Стан і перспективи розвитку вівчарства та козівництва в Запорізькій області. У *Інтенсифікація кормовиробництва – основа сталого розвитку галузі тваринництва* (с. 71-74). Полтава.

8. Доруда, С. О., & Алієв, Е. Б. (2015). До оцінки якості роботи змішувача-кормороздавача потокового типу. У Інтенсифікація кормовиробництва – основа сталого розвитку галузі тваринництва (с. 75-77). Полтава.
9. Алієв, Е. Б., Луц, П. М., & Верета, В. В. (2019). Обґрунтування конструктивно-технологічної схеми роторно-кавітаційного диспергатора кормосумішей. У Сучасні проблеми та технології аграрного сектору України (с. 17-25). Ніжин.
10. Алієв, Е. Б., & Малегін, Р. Д. (2020). Ефективність впровадження технології годівлі тварин кормами після кавітаційної обробки. У Матеріали XVI міжнародної науково-практичної конференції «Найновите научні постиження – 2020» (с. 39-41). Софія: Бял ГРАД-БГ ОДД.
11. Алієв, Е. Б., Миколенко, С. Ю., Яропуд, В. М., & Малегін, Р. Д. (2020). Обґрунтування конструктивно-технологічної схеми кавітаційного диспергатора-гомогенізатора сільськогосподарської сировини рослинного походження на кормові цілі. Техніка, енергетика, транспорт АПК, 2(109), 5-15. <https://doi.org/10.37128/2520-6168-2020-2-1>
12. Алієв, Е. Б., & Малегін, Р. Д. (2020). Обґрунтування доцільності використання диспергаторів рідких кормів. У Матеріали XXI Міжнародної наукової конференції «Сучасні проблеми землеробської механіки» (с. 7). Харків: ХНТУСГ.
13. Алієв, Е. Б., Дудін, В. Ю., Алієва, О. Ю., & Малегін, Р. Д. (2020). Результати чисельного моделювання кавітаційного диспергатора рідких кормів. Технічний сервіс агропромислового, лісового та транспортного комплексів, 21, 33-40. <https://doi.org/10.37700/ts.2020.21.33-40>
14. Алієв, Е. Б., & Лінко, М. О. (2022). Аналіз техніко-технологічного оснащення процесів експандованого приготування кормів. Техніка, енергетика, транспорт АПК, 1(116), 51-57.

15. Алієв, Е. Б., & Лінко, М. О. (2022). Методика чисельного моделювання процесу експандованого приготування кормів. У Наукові аспекти формування сучасних агротехнологій (с. 160-161). Херсон: ІЗЗ НААН.
16. Алієв, Е. Б., & Лінко, М. О. (2022). Аналіз техніко-технологічного оснащення процесів експандованого приготування кормів. Корми і факти, 9(145), 8-10.
17. Алієв, Е. Б., Лінко, М. О., & Алієва, О. Ю. (2022). Симуляція процесу експандованого приготування кормів. Центральнотраїнський науковий вісник. Технічні науки, 5(36), ч. II, 176-185. [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2022.5\(36\).2.176-185](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2022.5(36).2.176-185)
18. Алієв, Е. Б., & Лінко, М. О. (2022). Експандоване приготування кормів. У Матеріали Всеукраїнської науково-практичної конференції «Досягнення та перспективи галузі виробництва, переробки і зберігання сільськогосподарської продукції» (с. 38-40). Кропивницький: ЦНТУ.
19. Алієв, Е., Малегін, Р., & Алієва, О. (2022). Етапи розробки гомогенізатора-диспергатора рідких кормів. У Матеріали Всеукраїнської науково-практичної конференції «Досягнення та перспективи галузі виробництва, переробки і зберігання сільськогосподарської продукції» (с. 40-41). Кропивницький: ЦНТУ.
20. Алієв, Е. Б., Кошулько, В. С., & Кочережко, Н. В. (2023). Обґрунтування конструктивно-технологічних параметрів роторного змішувача комбикормів періодичної дії. Техніка, енергетика, транспорт АПК, 3(122), 5–13. <https://doi.org/10.37128/2520-6168-2023-3-1>
21. Алієв, Е. Б., & Лінко, М. О. (2023). Обґрунтування конструктивних параметрів формуючої насадки експандера кормів. Механіка та автоматика агропромислового виробництва, 2(216), 143–152. <https://doi.org/10.37204/2786-7765-2023-2-15>
22. Алієв, Е. Б., & Лінко, М. О. (2023). Експериментальні дослідження експандера кормів. У Збірник тез доповідей XXIV Міжнародної наукової конференції

«Сучасні проблеми землеробської механіки» (с. 229–232). Національний університет біоресурсів і природокористування України.

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

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

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

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

27. Horsthuis, D., Grunder, D., Postel, W., Slebos, N., Ningbers, M., Weda, J., Helthuis, R., & Kuchta, M. (2018). Het optimaliseren en verscalen van het huidige 3D-printsysteem. Saxion University of Applied Sciences.

28. Sarkar, S., & Chaudhuri, B. (2018). DEM modeling of high shear wet granulation of a simple system. *Asian Journal of Pharmaceutical Sciences*, 13(3), 220–228.

29. Suresh, P., Sreedhar, I., Vaidhiswaran, R., & Venugopal, A. (2017). A comprehensive review on process and engineering aspects of pharmaceutical wet granulation. *Chemical Engineering Journal*, 328, 785–815.

30. Ammarcha, C., Gatumel, C., Dirion, J.-L., Cabassud, M., & Berthiaux, H. (2017). Continuous powder mixing of segregating mixtures under steady and unsteady state

regimes: Homogeneity assessment by real-time on-line image analysis. *Powder Technology*, 315, 39–52.

31. 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.

32. Sen, M., Karkala, S., Panikar, S., Lyngberg, O., Johnson, M., Marchut, A., Schafer, E., & Ramachandran, R. (2017). Analyzing the Mixing Dynamics of an Industrial Batch Bin Blender via Discrete Element Modeling Method. *Processes*, 5(22), 2017.

33. Jarray, A., Magnanimo, V., Ramaioli, M., & Luding, S. (2017). Scaling of wet granular flows in a rotating drum. In *Powders and Grains 2017 - 8th International Conference on Micromechanics on Granular Media* (pp. 1–6). Montpellier, France.

34. Jarray, A., Magnanimo, V., & Luding, S. (2017). Wet granular flow control through liquid induced cohesion. *Powder Technology*.

35. Hou, Q. F., Dong, K. J., & Yu, A. B. (2014). DEM study of the flow of cohesive particles in a screw feeder. *Powder Technology*, 256, 529–539.

36. Orefice, L., & Khinast, J. G. (2017). DEM study of granular transport in partially filled horizontal screw conveyors. *Powder Technology*, 305, 347–356.

37. Qi, F., Heindel, T. J., & Wright, M. M. (2017). Numerical study of particle mixing in a lab-scale screw mixer using the discrete element method. *Powder Technology*, 308, 334–345.

38. Wang, S., Li, H., Tian, R., Wang, R., Wang, X., Sun, Q., & Fan, J. (2019). Numerical simulation of particle flow behavior in a screw conveyor using the discrete element method. *Particuology*, 43, 137–148.

39. Tsai, W.-R., & Lin, C.-I. (2018). On the mixing of granular materials in a screw feeder. *Advances in Materials Science and Engineering*.

40. Roy, S. (2017). *Hydrodynamic Theory of Wet Particle Systems* (PhD thesis, University of Twente).

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

Чисельне моделювання гвинтового змішувача вологих кормів

Виконав: магістрант групи МгАІ-2-23
Сидоренко Вячеслав Володимирович

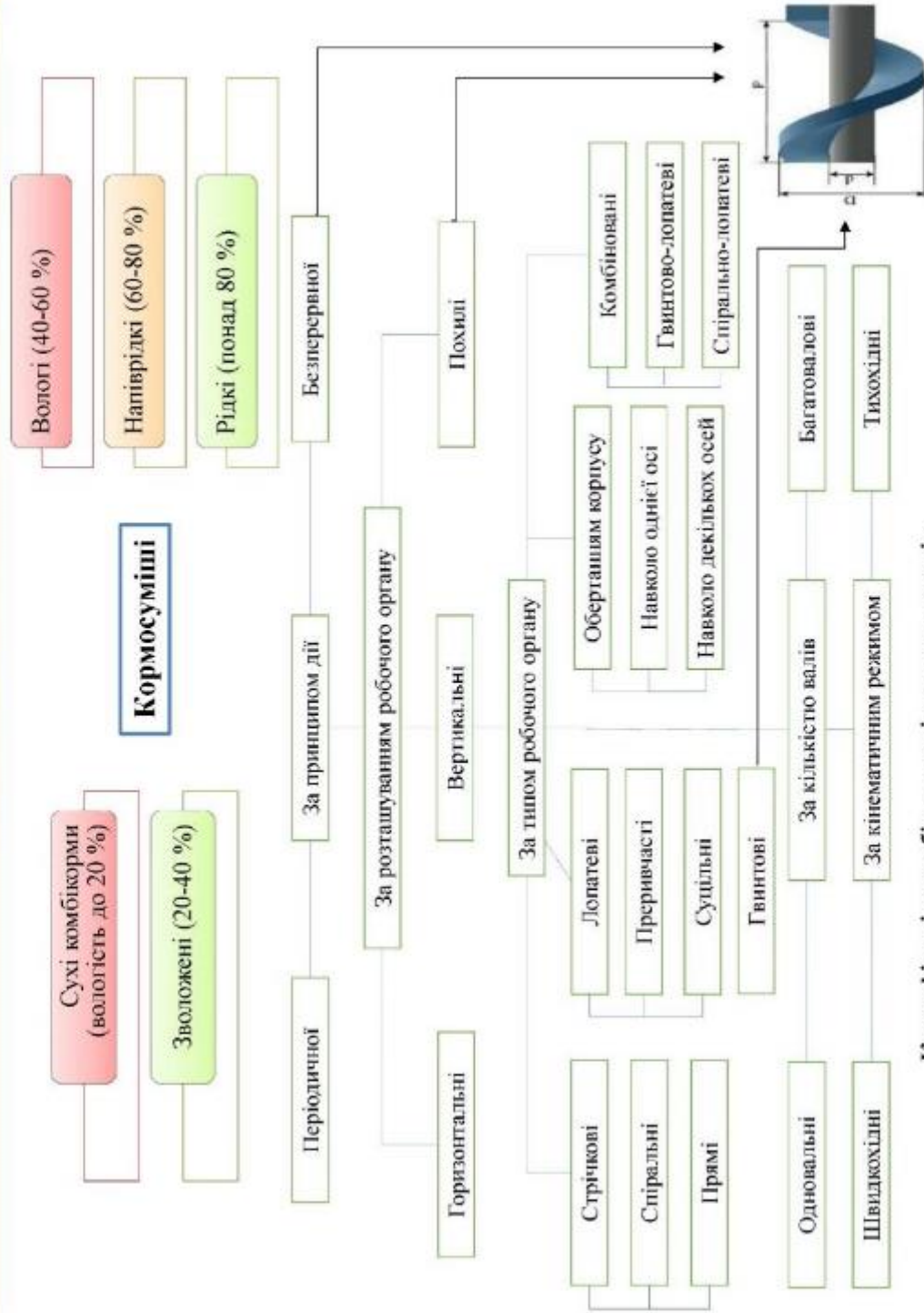
Керівник: доктор філософії
Лушко Кристина Олегівна

Дніпро, 2024

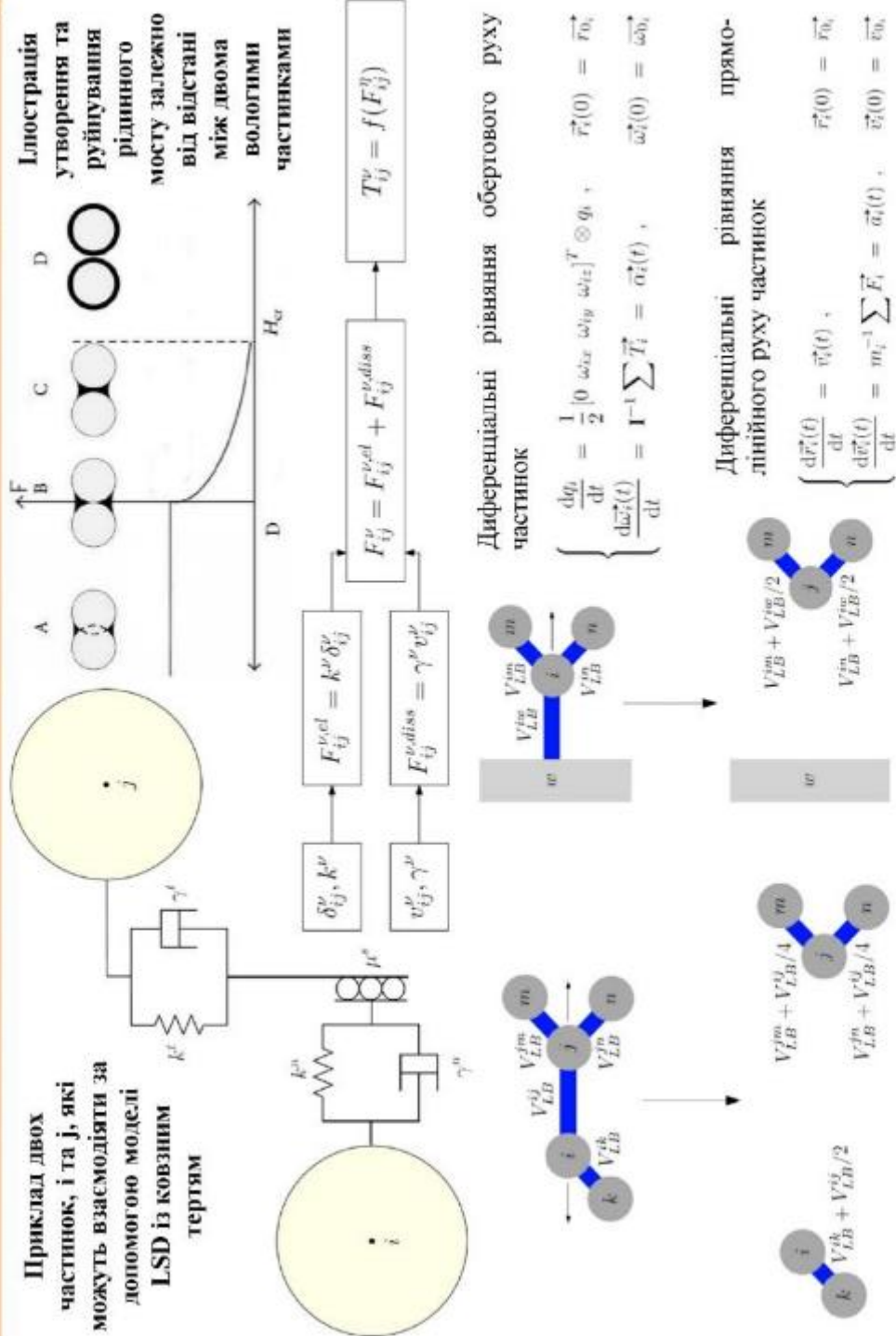
Метою дослідження є оптимізація технології змішування вологих кормових компонентів шляхом визначення параметрів гвинтового змішувача безперервної дії для покращення ефективності процесу.

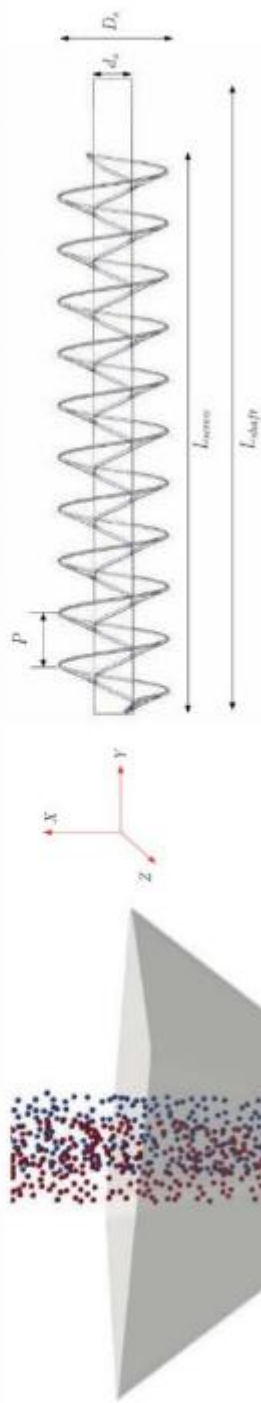
Для досягнення цієї мети передбачається виконати наступні **задачі досліджень**:

1. Дослідити сучасний стан і перспективні напрямки розвитку технологій вологого годування тварин.
2. Вивчити конструктивні особливості та принципи роботи існуючих засобів для змішування кормів з метою визначення можливостей їх вдосконалення.
3. Провести аналіз досліджень механізмів змішування у гвинтових конвесрах, оцінити їх ефективність і вплив на однорідність кормової суміші.
4. Розробити фізико-математичний апарат моделювання процесу змішування компонентів кормів для аналізу впливу конструктивних і технологічних параметрів.
5. Виконати чисельне моделювання процесу змішування для оцінки впливу геометричних параметрів змішувача, взаємодії компонентів та їх фізико-механічних властивостей на якість змішування.
6. Провести оцінку економічної ефективності використання вдосконаленого змішувача вологих кормів, визначити економічні переваги та термін окупності порівняно зі стандартними моделями.



Класифікація засобів для змішування кормів





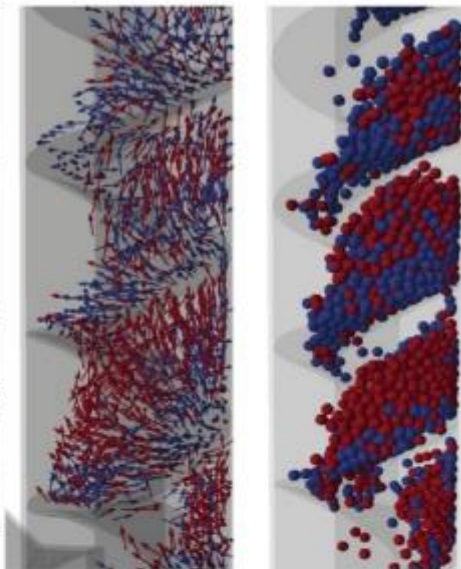
Ілюстрація змішувального шнека з представленими розмірами

Параметр	Значення
Довжина шнека L_{screw} [м]	0,472
Довжина вала L_{shaft} [м]	0,55
Крок P [м]	0,045
Діаметр шнека D_s [м]	0,09
Діаметр вала d_s [м]	0,03

Геометрія, використана в моделюванні

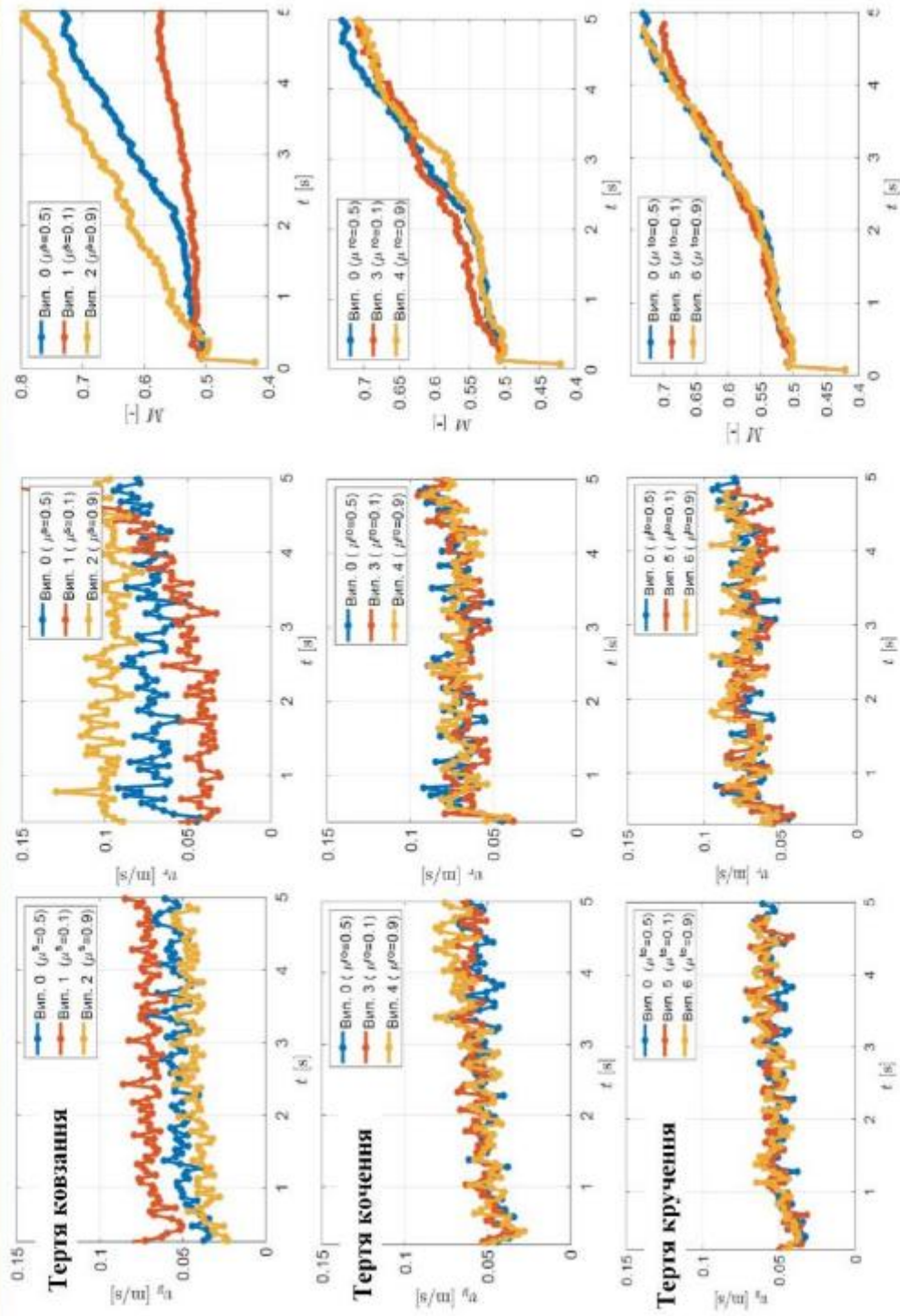
Вплив параметрів взаємодії

Випадок	Вид	ϵ^n	μ^s [-]	μ^m [-]	μ^{60} [-]
Випадок 0	всі	0,5	0,5	0,5	0,5
Випадок 1	всі	0,5	0,1	0,5	0,5
Випадок 2	всі	0,5	0,9	0,5	0,5
Випадок 3	всі	0,5	0,5	0,1	0,5
Випадок 4	всі	0,5	0,5	0,9	0,5
Випадок 5	всі	0,5	0,5	0,5	0,1
Випадок 6	всі	0,5	0,5	0,5	0,9
Випадок 7	0-1, 0-2, 1-1, 2-2, 1-2	0,5	0,1	0,5	0,5
Випадок 8	0-1, 0-2, 1-1, 2-2, 1-2	0,5	0,9	0,5	0,5
Випадок 9	0-1, 0-2, 1-1, 2-2, 1-2	0,5	0,5	0,5	0,5
Випадок 10	0-1, 0-2, 1-1, 2-2, 1-2	0,5	0,5	0,5	0,5



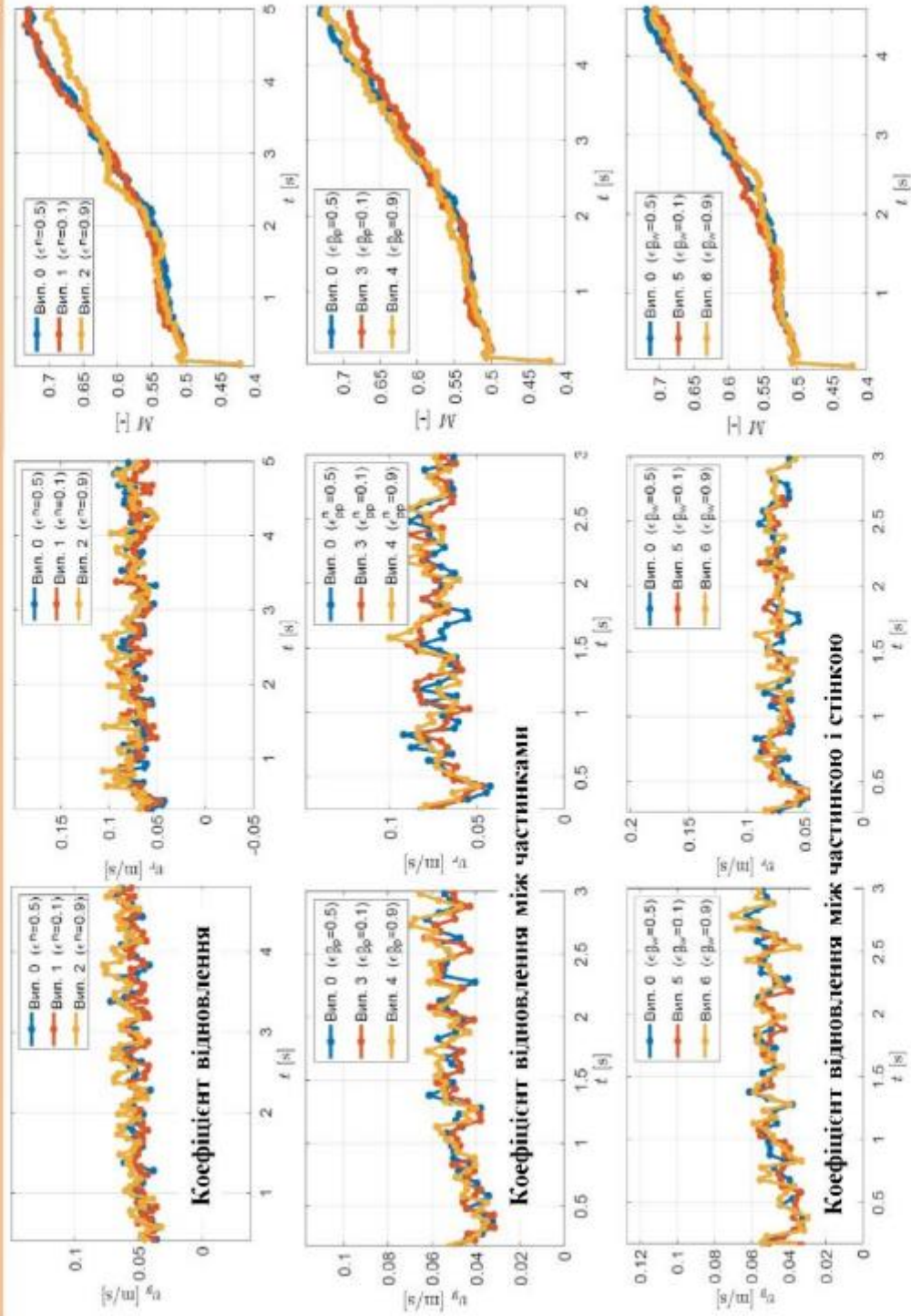
Результати чисельного моделювання процесу змішування

6



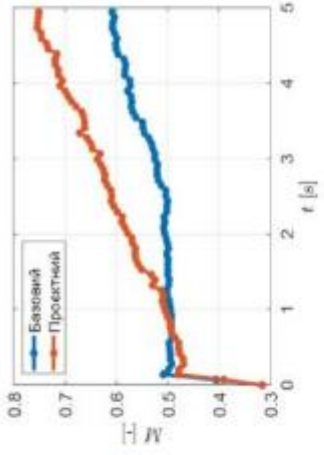
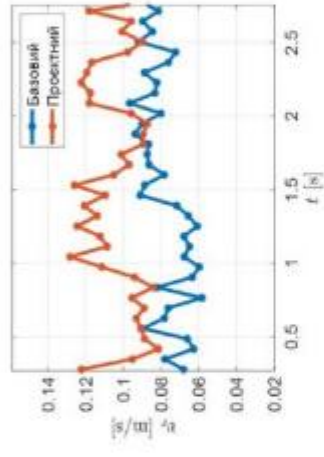
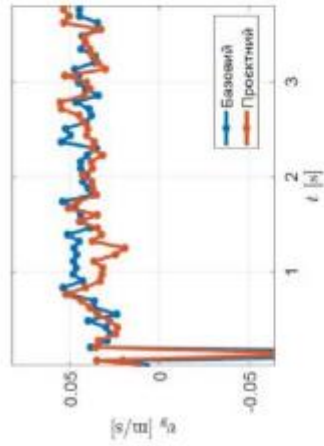
Результати чисельного моделювання процесу змішування

7



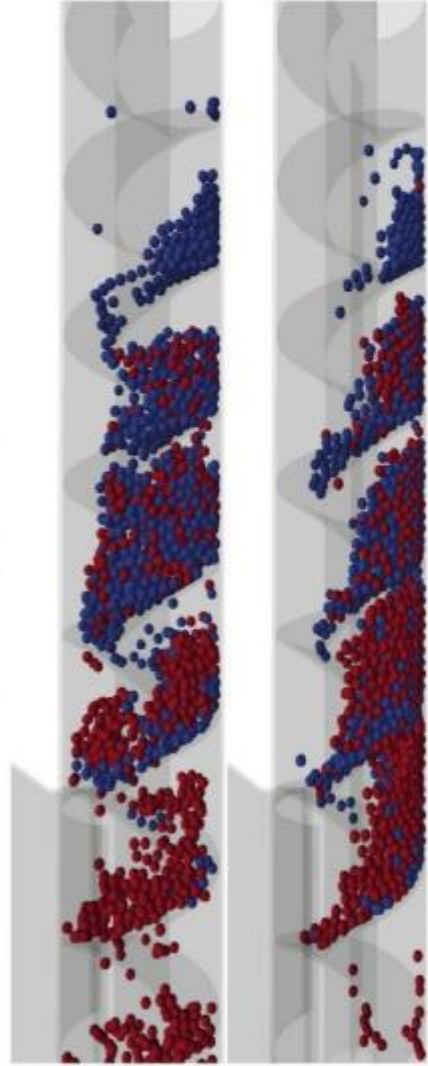


Конструкція удосконаленого гвинта



Середня осьова швидкість і середня обертова швидкість

Індекс змішування



Потік частинок із використанням базової конструкції (зверху) та удосконаленої (знизу) при $t \approx 3,97$ с

Вихідні дані

Показник	Устаткування	
	базове	розроблене
Потужність, кВт	2,2	2,2
Продуктивність, т/год	1,125	1,8
Обслуговуючий персонал, люд.	1	1
Строк служби, років	10	10
Тривалість зміни, год.	8	8
Коефіцієнт відрахувань на ТО та ремонт	0,14	0,14
Коефіцієнт амортизаційних відрахувань	0,1	0,11
Капітальні вкладення, грн.	-	40 500
Балансова вартість, грн.	50 000	-

Результати розрахунку

Параметри	Стандартний змішувач	Розроблений змішувач
1. Витрати на виплату заробітної плати (грн/т)	43,88	27,42
2. Витрати на електроенергію (грн/т)	5,16	3,23
3. Амортизаційні відрахування (грн/т)	1,51	0,77
4. Витрати на технічне обслуговування і ремонт (грн/т)	2,12	1,07
Загальні експлуатаційні витрати (грн/т)	52,67	32,49
Економія витрат (грн/т)	—	20,18
Обсяг робіт для розробленого змішувача (т/рік)	—	3311
Термін окупності (роки)	—	0,606

1. Перспективним напрямком розвитку вологої тварин в українських господарствах є впровадження кормосумішей на основі бобово-злакових культур та побічних продуктів промисловості, що дозволяє знизити витрати на комбікорми та забезпечити збалансоване харчування. Використання гвинтових змішувачів в даному процесі є оптимальним рішенням, завдяки їх високій ефективності, енергоощадності та адаптивності до вологих компонентів.
2. Для ефективного моделювання процесу змішування частинок у змішувачі необхідно враховувати різні типи взаємодій між сухими та вологими частинками, включаючи сили відштовхування та когезійні сили через рідинні мости. Використання методу дискретних елементів (DEM) дозволяє точно моделювати ці взаємодії та досягати високої точності у визначенні траєкторій частинок, забезпечуючи стабільність числового моделювання при правильному виборі кроку часу.
3. Було встановлено, що збільшення кількості частинок у симуляції, завдяки зменшенню їх розміру, дозволяє отримати більш точні профілі швидкостей. Аналіз впливу тертя показав, що тертя ковзання має вирішальне значення для змішування, сприяючи рециркуляції частинок. Водночас тертя кочення та кручення мають незначний вплив, а коефіцієнт відновлення майже не впливає на поведінку змішування.
4. Сили зчеплення значно впливають на рух матеріалу в осьовому напрямку, уповільнюючи його, та сприяють радіальному транспортуванню частинок. Проте, зі збільшенням зчеплення індекс змішування зменшується, вказуючи на недостатню ефективність простого дизайну шнека у руйнуванні агломератів. Удосконалена конструкція гвинта змішувача підвищує радіальну швидкість і індекс змішування для матеріалів з низькою або середньою силою зчеплення, проте при дуже високих значеннях зчеплення його ефективність знижується.
5. Забезпечення охорони праці та безпеки в цехі по виробництву зволжених кормів з рослинної сировини є ключовим аспектом, що вимагає комплексного підходу. Ідентифікація ризиків, навчання працівників, регулярний моніторинг і впровадження стандартів безпеки можуть суттєво знизити ймовірність виникнення небезпечних ситуацій. Тільки завдяки спільним зусиллям усіх учасників процесу можна забезпечити безпечну та ефективну роботу цеху, що, у свою чергу, сприятиме підвищенню продуктивності та якості виробництва.
6. Порівняльний аналіз удосконаленого змішувача із базовим показав, що експлуатаційні витрати для удосконаленого змішувача становлять 32,49 грн/т, що на 20,18 грн/т менше, ніж у стандартного змішувача (52,67 грн/т). Економія витрат на одиницю продукції сприяє швидкій окупності інвестицій у новий змішувач, яка становить лише 0,606 року при завантаженні обладнання на 70%. Це робить удосконалення змішувача не тільки технічно, але й економічно обґрунтованою, забезпечуючи підвищену рентабельність виробництва та скорочення експлуатаційних витрат.