ГАЛУЗЕВЕ МАШИНОБУДУВАННЯ

УДК 631.22:631.363 https://doi.org/10.32515/2664-262X.2026.14(45).452-460

Е. Б. Алієв, проф., д-р техн. наук, ст. досл., **Р. Г. Пономаренко**
Дніпровський державний аграрно-економічний університет, м. Дніпро, Україна
e-mail: aliev@meta.ua

Результати попередніх досліджень Y-подібного змішувача кормових матеріалів

Якість приготування кормових сумішей є визначальним чинником ефективності тваринництва, оскільки рівномірність розподілу компонентів безпосередньо впливає на поживну цінність і збалансованість корму. У статті представлено результати попередніх досліджень процесу змішування кормових матеріалів у Y-подібному змішувачі з керованими режимами роботи. Обґрунтовано конструктивно-технологічну схему змішувача та принцип його дії. Для аналізу фізичних закономірностей процесу використано чисельне моделювання на основі поєднання методів обчислювальної гідродинаміки та дискретних елементів (CFD–DEM) у середовищі Simcenter Star-CCM+. Досліджено вплив геометричних і режимних параметрів на кінетику змішування та коефіцієнт однорідності суміші. Визначено раціональні значення основних параметрів, за яких забезпечується коефіцієнт однорідності 0,95 при мінімальній тривалості процесу. Спроєктовано та виготовлено лабораторний стенд і розроблено методику експериментальних досліджень, що створює основу для подальшої оптимізації конструкції та оцінювання енергоефективності Y-подібного змішувача кормових матеріалів.

кормові матеріали, змішувач, однорідність суміші, CFD–DEM моделювання, конструктивні параметри, експериментальні дослідження

Постановка проблеми. Якість приготування кормових сумішей є одним із ключових чинників підвищення продуктивності тваринництва, оскільки рівномірне змішування компонентів прямо впливає на поживну цінність, збалансованість та однорідність корму, що споживається тваринами. За зоотехнічними вимогами, процес змішування вважається оптимальним, якщо відхилення від рецептурного складу в готовій суміші не перевищують допустимі межі, а однорідність забезпечує відповідні зоотехнічні показники якості корму [1–2].

Традиційні конструкції змішувачів кормів – стрічково-лопатеві, барабанні чи інші типи механізмів – мають обмеження, пов’язані з недостатньою однорідністю суміші, неефективним використанням енергії, великим часом змішування та значними витратами на привід. Так, у багатофакторних дослідженнях змішувачів відзначається, що інші конструкції часто не здатні забезпечити стабільну однорідність компонентів, особливо при змішуванні сипких матеріалів з різною гранулометрією та щільністю [3–5].

Крім того, у практиці змішування кормів існують технологічні проблеми, пов’язані з ефективністю процесу та його контролем: недостатня тривалість змішування, перевантаження обладнання, знос робочих елементів і неправильно підібрана послідовність завантаження компонентів призводять до низької якості суміші та істотної варіації її складу [6].

Також важливою проблемою є неоднозначність методів оцінювання однорідності та її вплив на якість готового продукту – класичні методи випробувань часто пов’язані з операційними труднощами, впливають на матеріал та не завжди забезпечують точні результати [7–9].

У наукових дослідженнях [10–11] підкреслюється, що фізичні процеси змішування сипких матеріалів досі недостатньо вивчені, особливо у випадку складних геометрій робочих камер змішувачів, що обмежує можливості конструювання високоефективних пристроїв.

© Е. Б. Алієв, Р. Г. Пономаренко, 2026

В умовах зростання вимог до якості кормових сумішей, автоматизації процесів та підвищення енергоефективності необхідно розробляти нові конструктивні рішення змішувачів, які забезпечують більш рівномірне розподілення компонентів, зменшують витрати часу та енергії, а також дозволяють гнучко управляти режимами роботи. Це зокрема стосується інноваційних геометрій робочої камери, таких як V- та Y-подібні змішувачі [12], що потребують комплексного аналізу конструктивних і режимних параметрів як на етапі моделювання, так і під час експериментальної перевірки.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Аналіз сучасної наукової літератури показує, що питання змішування кормових матеріалів, оптимізації конструкцій змішувачів та їх режимів роботи залишаються активними об'єктами досліджень у світовій та вітчизняній науці. Зокрема, увага фахівців зосереджена на підвищенні однорідності суміші, енергоефективності процесу, конструктивному вдосконаленні робочих органів та геометрії змішувальних камер [13].

У міжнародних публікаціях [14–15] з прикладної механіки та хіміко-технічних процесів останнім часом зростає інтерес до оптимізації характеристик змішувачів із використанням математичних методів, зокрема відгукової поверхні та CFD-аналізу. Так, у роботі [13–14] досліджено вплив структури лопатей на якість змішування кормових сумішей із застосуванням експериментального планування та методів оптимізації, що дозволяє підвищити ефективність процесу при заданій конфігурації робочого органа.

В іншому напрямі розглядається чисельне моделювання потоку сипких матеріалів у змішувачах. Наприклад, моделювання руху порошків у горизонтальному змішувачі із застосуванням моделей реології та CFD дозволяє оцінювати вплив геометрії та режимів на поведінку частинок під час роботи машини [15].

Інші дослідження [15–17] стосуються застосування комплексних CFD–DEM підходів у змішувальних процесах: оцінювання взаємодії частинок та середовища (газу або рідини) у середині барабанних чи пакетних змішувачів, що дає змогу глибше розуміти механізми формування однорідної суміші та оптимізувати конструктивні параметри обладнання.

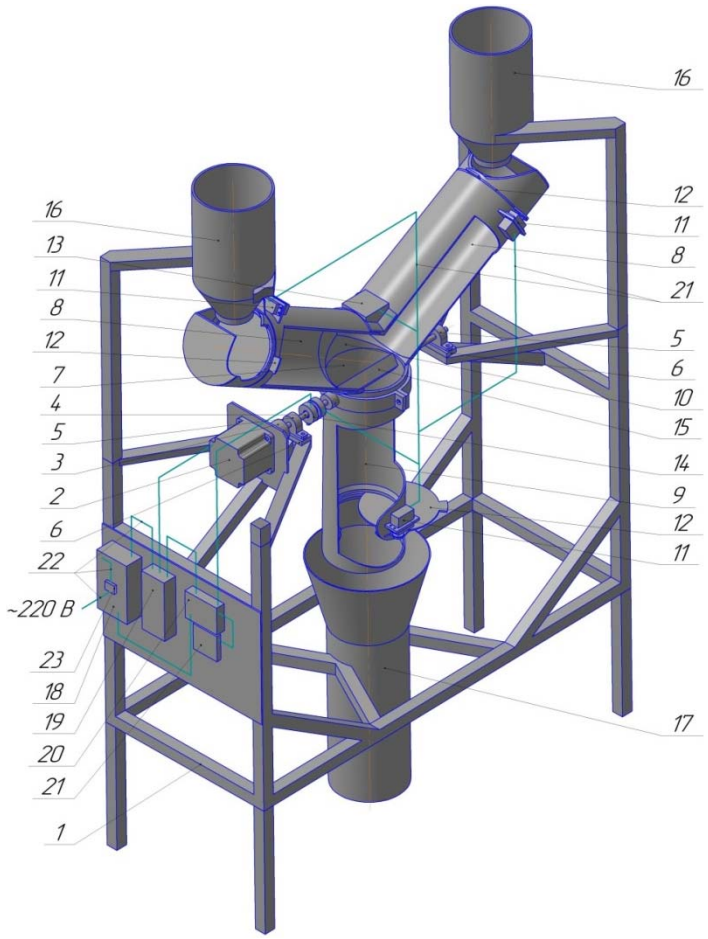
З погляду спеціалізованих аграрно-інженерних досліджень, існує значна кількість робіт, присвячених удосконаленню конструкцій кормозмішувачів та обґрунтуванню технологічних параметрів їх роботи. Так, у [18] наведено експериментальні дослідження впливу геометричних та режимних параметрів змішувача на якість приготування кормових сумішей та енергоспоживання обладнання.

Водночас існують і класичні огляди – зокрема, теоретичні дослідження [19–20] процесів змішування сипких матеріалів, де розглядаються базові механізми формування суміші, оцінювання якості та вплив конструктивних особливостей змішувачів різних типів.

Постановка завдання. Метою роботи є розроблення та наукове обґрунтування конструкції Y-подібного змішувача кормових матеріалів, а також попередні дослідження процесу змішування з використанням сучасних методів CFD–DEM моделювання та експериментальної перевірки.

Виклад основного матеріалу. Для досягнення поставленого завдання розроблено Y-подібний змішувач кормових матеріалів, конструктивно-технологічна схема якого наведена на рис. 1.

Y-подібний змішувач кормових матеріалів працює таким чином. Перед початком роботи здійснюють подачу електроживлення від електромережі до блока живлення, який забезпечує функціонування системи керування та привода обертання. Керування режимами роботи змішувача здійснюється оператором за допомогою клавіатури, а інформація про встановлені та поточні параметри відображається на дисплеї.



1 – станина; 2 – кроковий двигун; 3 – гнучка муфта; 4 – вал; 5 – корпусні підшипники на лапах; 6 – гумові демпфери; 7 – Y-подібна ємність; 8 – нахилені патрубки; 9 – прямий патрубок; 10 – фітинг-трійник; 11 – сервоприводи; 12 – заслінки; 13 – акселерометр; 14 – струмопровідне контактне кільце; 15 – розподільник; 16 – завантажувальні патрубки; 17 – вивантажувальний патрубок; 18 – блок живлення; 19 – контролер крокового двигуна; 20 – блок керування з дисплеєм; 21 – клавіатура; 22 – електричні проводи; 23 – кнопка вмикання

Рисунок 1 – Конструктивно-технологічна схема Y-подібного змішувач кормових матеріалів
Джерело: розроблено авторами

Оператор задає основні параметри процесу, зокрема частоту обертання Y-подібної ємності, період її обертання у кожному напрямку та загальну тривалість змішування кормових матеріалів, після чого запускає процес. Інформація про кут нахилу ємності, що надходить від акселерометра, використовується системою керування для формування керувальних сигналів привода. Привід обертання через гнучку муфту та вал передає обертальний рух Y-подібній ємності, яка встановлюється у вертикальне положення так, що два нахилені патрубки розташовані зверху, а прямий патрубок – знизу. Після цього відкриваються заслінки нахилених патрубків, і кормові матеріали із завантажувальних патрубків надходять у змішувальну ємність, заповнюючи її до заданого рівня. Після завершення завантаження заслінки закриваються. Далі ємність починає обертатися із заданими параметрами.

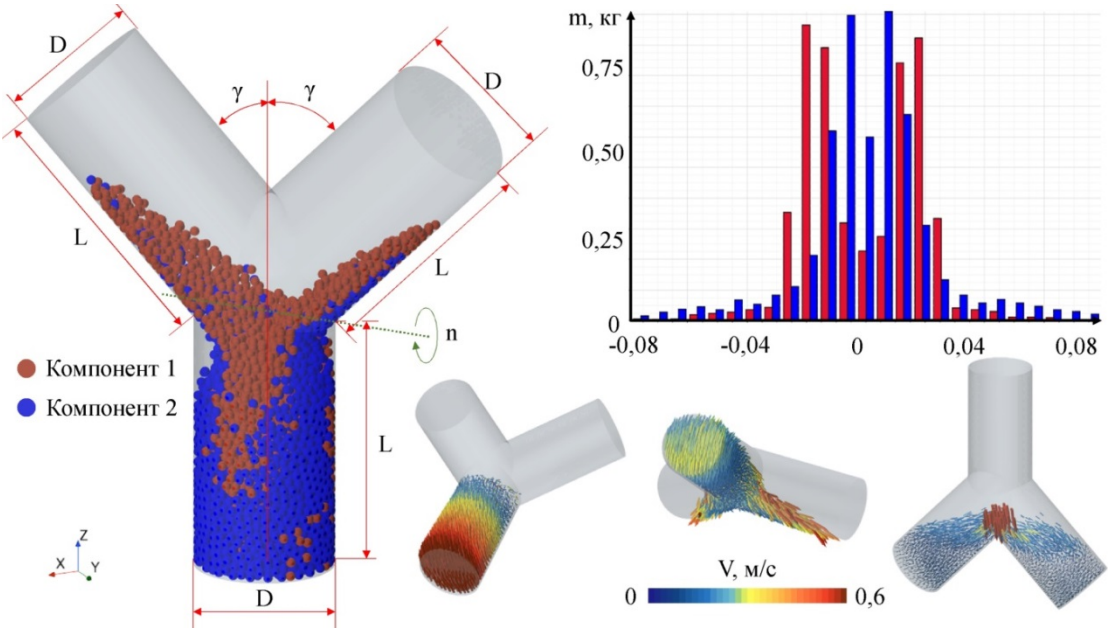
У процесі обертання кормові матеріали переміщуються під дією відцентрових сил, сили тяжіння та взаємодії з внутрішнім розподільником, що забезпечує інтенсивне та рівномірне перемішування компонентів корму. Додаткові коливання ємності, які виникають завдяки демпфувальним елементам, сприяють інтенсифікації процесу змішування, запобігають утворенню застійних зон і підвищують однорідність готової кормової суміші.

Акселерометр забезпечує контроль динамічних параметрів руху та передає відповідні сигнали до системи керування для коригування режимів роботи у реальному часі.

Після завершення заданої тривалості процесу змішування ємність знову встановлюється у вертикальне положення, після чого відкривається заслінка прямого патрубка, і готова кормова суміш під дією сили тяжіння вивантажується через вивантажувальний патрубок. Після завершення вивантаження заслінка закривається, і за необхідності процес може бути повторений.

Перший етап досліджень був спрямований на аналітичне обґрунтування конструктивний і режимних параметрів Y-подібного змішувача кормових матеріалів з використанням сучасних методів багатофазного моделювання. Для цього застосовано програмне середовище Simcenter Star-CCM+ [21], яке дозволяє поєднувати обчислювальну гідродинаміку з методом дискретних елементів і таким чином відтворювати складну взаємодію газового середовища та твердих частинок у робочому об’ємі змішувача.

На даному етапі сформовано геометричну та розрахункову чисельну модель Y-подібного змішувача (рис. 2), що враховує конструктивні особливості робочої камери та дає змогу варіювати ключові параметри, зокрема кут злиття патрубків, їх діаметр і довжину.



D – діаметр патрубків; L – довжина патрубків; γ – кут злиття патрубків; n – частота обертання; m – маса компонентів; V – швидкість руху частинок

Рисунок 2 – Геометрична та розрахункова чисельна модель Y-подібного змішувача

Джерело: розроблено авторами

Побудова просторової сітки із застосуванням поліедричних і триммер-елементів забезпечила адекватне відображення зон інтенсивного руху частинок і контактної взаємодії зі стінками при прийнятних обчислювальних витратах.

Фізична постановка задачі базувалася на нестаціонарному тривимірному підході, у якому повітряне середовище розглядалося як суцільна фаза, а кормові матеріали – як сукупність окремих твердих частинок, рух яких описувався у лагранжевій формі. Для частинок прийнято спрощене геометричне представлення у вигляді сфер із постійними фізико-механічними властивостями. Контактна взаємодія між компонентами преміксу та зі стінками змішувача моделювалася з урахуванням пружних і фрикційних ефектів, що дозволило відтворити реальні умови зіткнень у процесі перемішування.

У межах чисельних експериментів змодельовано стадії завантаження, активного змішування та завершального вирівнювання суміші (змішування/сегрегація) (рис. 3). Візуалізація траєкторій руху частинок, розподілу їх швидкостей і концентрацій у різних зонах робочої камери дала змогу простежити формування багатопоточних структур і оцінити характер циркуляції матеріалу під час обертання змішувача. Отримані часові залежності коефіцієнта однорідності в контрольних точках підтвердили наявність чітко виражених фаз процесу та дозволили визначити момент досягнення стабільного рівня змішування.

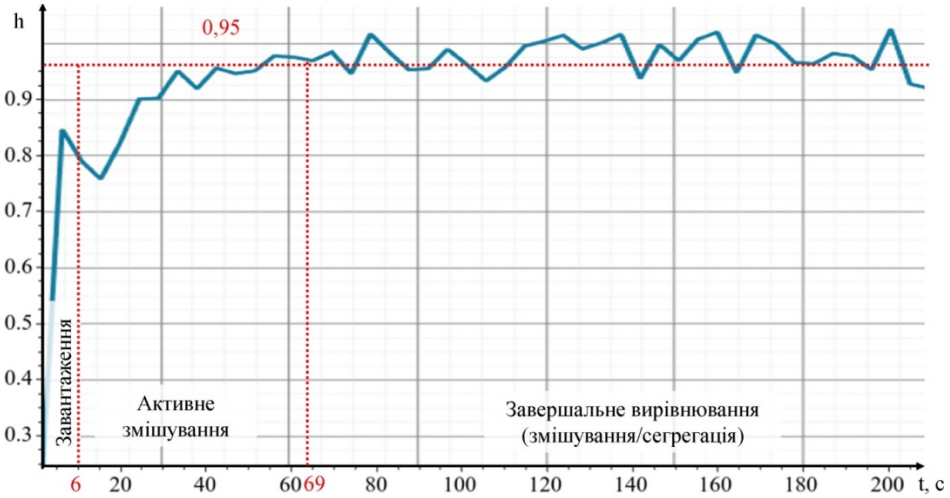


Рисунок 3 – Кінетика процесу змішування в Y-подібному змішувачі при γ = 46°, D = 186 мм, L = 371 мм, n = 22 об/хв

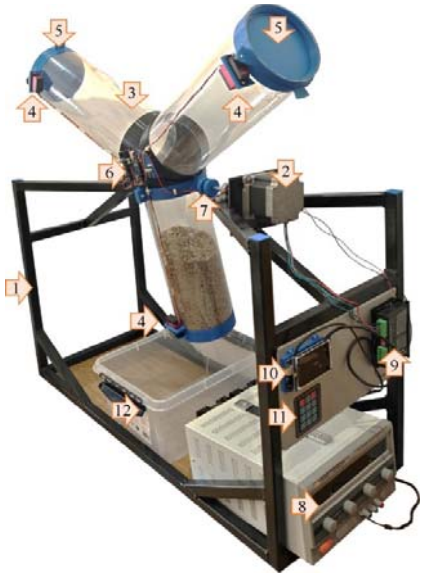
Джерело: розроблено авторами

У результаті варіювання параметрів Y-подібного змішувача встановлено, що досягнення коефіцієнта однорідності суміші 0,95 за мінімального часу змішування та збільшеного об'єму гілок змішувача можливе за раціонального поєднання конструктивних і режимних параметрів. За результатами обробки даних у середовищі Wolfram Cloud визначено оптимальні значення факторів дослідження: кут злиття патрубків γ = 46°, діаметр патрубків D = 186 мм, довжина патрубків L = 371 мм, частота обертання n = 22 об/хв. За цих умов тривалість процесу змішування становить τ = 69 с.

Таким чином, результати першого етапу досліджень підтверджують доцільність використання підходу CFD–DEM для аналізу роботи Y-подібного змішувача кормових преміксів. Сформована модель створює надійну основу для подальших експериментальних досліджень, оптимізації конструктивних і режимних параметрів, а також для оцінювання енергоефективності процесу змішування.

Друга стадія досліджень присвячена проведенню експериментальної перевірки результатів чисельного моделювання та встановленню закономірностей процесу змішування кормових матеріалів у Y-подібному змішувачі за реальних умов роботи. Основною метою експериментальних досліджень є оцінювання ефективності процесу змішування, уточнення впливу конструктивних і режимних параметрів на якість готової суміші, а також підтвердження раціональних значень факторів, отриманих на етапі CFD–DEM моделювання.

Друга стадія досліджень була спрямована на формування експериментальної бази для подальшого вивчення процесу змішування кормових матеріалів у Y-подібному змішувачі та на розроблення методики проведення експериментальних досліджень. На цьому етапі виконано проєктування, виготовлення та перевірку працездатності лабораторного стенду (рис. 4), а також сформовано систему факторів, критеріїв і засобів вимірювання, які планується використати під час наступної стадії експериментів.



1 – станина; 3 – Y-подібна ємність; 4 – сервоприводи; 5 – заслінки; 6 – акселерометр; 7 – струмопровідне контактне кільце; 8 – блок живлення; 9 – контролер крокового двигуна; 10 – блок керування з дисплеєм; 11 – клавіатура; 12 – ємність для збору суміші

Рисунок 4 – Загальний вигляд стенду Y-подібного змішувач кормових матеріалів
Джерело: розроблено авторами

Для реалізації експериментальних досліджень виготовлено лабораторний стенд Y-подібного змішувача кормових матеріалів, конструкція якого відповідає принциповій схемі (рис. 1) та результатам чисельного моделювання (рис. 2).

Y-подібна ємність стенду виконана модульною, що забезпечує можливість варіювання геометричних параметрів гілок без зміни базової конструкції. Передбачено заміну патрубків різної довжини та діаметра, а також використання змінних фітингів для встановлення різних кутів злиття гілок. Такий конструктивний підхід створює умови для систематичного дослідження впливу геометрії робочого органа на процес змішування кормових матеріалів на наступних етапах роботи.

Система завантаження та вивантаження кормових матеріалів оснащена керованими заслінками, що унеможливлює неконтрольовану подачу або передчасне вивантаження суміші. Це забезпечує відтворюваність умов майбутніх експериментів і чітке розмежування стадій завантаження, змішування та вивантаження.

Для контролю динамічних параметрів роботи Y-подібної ємності на стенді встановлено акселерометр у зоні злиття гілок. Передача сигналів від датчика здійснюється через струмопровідне контактне кільце, що забезпечує безперервне електроживлення та зчитування даних з рухомих елементів. На другій стадії виконано перевірку працездатності системи збору даних і стабільності сигналів акселерометра в усьому діапазоні робочих швидкостей обертання.

Після виготовлення стенду проведено комплекс пусконалагоджувальних робіт і функціональних випробувань без навантаження та з холостим прокручуванням робочої ємності. У ході перевірки підтверджено коректність роботи привода, системи керування, сервоприводів заслінок і вимірювальних датчиків, а також відсутність резонансних режимів у допустимому діапазоні частот обертання. Це дозволило зробити висновок про готовність стенду до проведення експериментальних досліджень.

Паралельно зі створенням стенду розроблено методику експериментальних досліджень процесу змішування кормових матеріалів у Y-подібному змішувачі. Методика передбачає проведення серії дослідів за планом багатофакторного експерименту з керованою зміною основних конструктивних і режимних параметрів. До факторів

досліджень віднесено довжину гілок Y-подібної ємності, діаметр їх поперечного перерізу, кут злиття гілок, частоту обертання робочої ємності та тривалість змішування.

Визначено критерії оцінювання ефективності процесу змішування, основним з яких є коефіцієнт однорідності кормової суміші, що планується визначати за результатами відбору проб із кількох контрольних зон робочого об'єму. Додатково передбачено оцінювання енергетичних показників процесу шляхом вимірювання споживаної потужності привода змішувача.

Таким чином, на другій стадії досліджень створено та перевірено експериментальний стенд Y-подібного змішувача кормових матеріалів, а також розроблено методику проведення експериментальних досліджень. Безпосереднє виконання експериментів, одержання та аналіз кількісних результатів передбачається здійснити на наступній стадії роботи.

Висновки. Розроблено конструкцію Y-подібного змішувача кормових матеріалів із керованими режимами роботи, що забезпечує інтенсивне переміщення компонентів за рахунок поєднання обертального руху робочої ємності, дії відцентрових і гравітаційних сил, а також додаткових коливань, сформованих демпфувальними елементами.

Створено геометричну та розрахункову чисельну модель Y-подібного змішувача у середовищі Simcenter Star-CCM+ з використанням підходу CFD–DEM, що дозволило відтворити реальні умови взаємодії сипких кормових матеріалів між собою та зі стінками робочої камери. За результатами чисельних експериментів встановлено наявність чітко виражених стадій процесу змішування: завантаження, активного перемішування та стабілізації однорідності суміші. Отримані часові залежності коефіцієнта однорідності підтвердили можливість досягнення високої якості змішування в межах короткого технологічного циклу. Визначено раціональні значення конструктивних і режимних параметрів Y-подібного змішувача, за яких забезпечується коефіцієнт однорідності суміші 0,95: кут злиття патрубків $\gamma = 46°$, діаметр патрубків $D = 186$ мм, довжина патрубків $L = 371$ мм, частота обертання $n = 22$ об/хв, при тривалості процесу змішування $\tau = 69$ с.

Спроєктовано та виготовлено лабораторний стенд Y-подібного змішувача кормових матеріалів, конструкція якого відповідає результатам чисельного моделювання та забезпечує можливість варіювання основних геометричних параметрів робочої ємності. Розроблено методику експериментальних досліджень, яка створює основу для подальшого вивчення закономірностей процесу змішування, експериментального підтвердження результатів моделювання та оцінювання енергетичної ефективності Y-подібного змішувача кормових матеріалів.

Список літератури

1. Кісільов Р. В., Лузан П. Г., Амосов В. В., Васильковський М. О. Дослідження впливу конструктивних параметрів змішувача на якість приготування кормової суміші. *Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки: наук. зб.* 2025. Вип. 12(43), ч. 1. С. 187–194. DOI: 10.32515/2664-262X.2025.12(43).1.187-194
2. Кісільов Р. В., Хмельовський В. С., Лузан П. Г., Сисоліна І. П. Дослідження двосекційного змішувача для приготування збалансованих сумішей на фермах ВРХ. *Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин: загальнодерж. міжвід. наук.-техн. зб.* 2020. Вип. 50. С. 107–113. DOI: 10.32515/2414-3820.2020.50.107-113
3. Кісільов Р. В., Матвєєв К. Д., Лузан П. Г. Дослідження технологічної ефективності змішування кормів двоступеневим одновальним комбінованим змішувачем періодичної дії. *Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин: загальнодерж. міжвід. наук.-техн. зб.* 2013. Вип. 43, ч. 2. С. 108–112.
4. Дудін В. Ю., Говоруха В. Б. Обґрунтування конструктивно-технологічних параметрів стрічково-гвинтового змішувача сипких кормів. *Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин: загальнодерж. міжвід. наук.-техн. зб.* 2023. Вип. 53. С. 112–121. DOI: 10.32515/2414-3820.2023.53.112-12
5. Кісільов Р. В., Лузан П. Г., Мачок Ю. В., Нестеренко О. В. Дослідження процесу приготування кормових сумішей для ВРХ комбінованим змішувачем. *Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин: загальнодерж. міжвід. наук.-техн. зб.* 2014. Вип. 44. С. 20–24.

6. Kupchuk I., Yaropud V., Hraniak V., Poberezhets J., Tokarchuk O., Hon-tar V., Didyk A. Multicriteria compromise optimization of feed grain grinding process. *Przegląd el-ektrotechniczny*. 2021. Vol. 97 (11). P. 179–183. DOI: 10.15199/48.2021.11.33
7. Xin J. DEM Study on the Mixing Behaviour of U-shaped Ribbon Mixers. *A thesis submitted in fulfilment of the requirements for the degree of Doctor of Philosophy.* 2022. 292 p.
8. Park C., Kim J., Landon R. S., Lyu B., Cho H., Moon I. Novel evaluation method for the continuous mixing process of bimodal particles. *Powder Technology*. 2018. Vol. 344. P. 636–646. DOI: 10.1016/j.powtec.2018.12.052
9. Bhalode P., Ierapetritou M. A review of existing mixing indices in solid-based continuous blending operations. *Powder Technology*. 2020. Vol. 373. P. 195–209. DOI: 10.1016/j.powtec.2020.06.043
10. Chandratilleke G. R., Bridgwater A. Yu, J., Shinohara K. A particle-scale index in the quantification of mixing of particles. AIChE journal. 2012. Vol. 58. P. 1099–1118. DOI: 10.1002/aic.12654
11. Cho M., Dutta P., Shim J. A non-sampling mixing index for multicomponent mixtures. *Powder Technology*. 2017. Vol. 319. P. 434–444. DOI: 10.1016/j.powtec.2017.07.011
12. Lemieux M., Bertrand F., Chaouki J., Gosselin P. Comparative study of the mixing of free-flowing particles in a V-blender and a bin-blender. *Chemical Engineering Science*. 2007. Vol. 62. P. 1783–1802. DOI: 10.1016/j.ces.2006.12.012
13. Алієв Е. Б., Кошулько В. С., Кочережко Н. В. Обґрунтування конструктивно-технологічних параметрів роторного змішувача комбікормів періодичної дії. *Техніка, енергетика, транспорт АПК*. 2023. Вип. 3 (122). С. 5–13. DOI: 10.37128/2520-6168-2023-3-1
14. Biroun M. H., Sorensen E., Hilden J. L., Mazzei L. CFD modelling of powder flow in a continuous horizontal mixer. *Powder Technology*. 2023. Vol. 428. 118843. DOI: 10.1016/j.powtec.2023.118843
15. Pezo M., Pezo L., Jovanović A., Lončar B., Čolović R. DEM/CFD approach for modeling granular flow in the revolving static mixer. *Chemical Engineering Research and Design*. 2016. Vol. 109. P. 317–326. DOI: 10.1016/j.cherd.2016.02.003
16. Shevchenko I., Aliiev E. Improving theefficiency ofthe process ofcontinuous flowmixing of bulkcomponents. Eastern-*European Journal of Enterprise Technologies*. 2020. Vol. 6/1 (108). P. 6–13. DOI: 10.15587/1729-4061.2020.216409
17. Lee S.J., Hwang S.-Y. Comparative Study to Evaluate Mixing Efficiency of Very Fine Particles. *Applied Sciences.* 2025. Vol. 15. P. 8712. DOI: 10.3390/app15158712
18. Гевко І. Б., Дячун А. Є., Тарасюк Ю. М. Результати експериментальних досліджень якості змішування кормових сумішей гвинтовим транспортером – змішувачем. *Вісник Житомирського національного агроекологічного університету*. 2014. Вип. 2. С. 309–315.
19. Pezo M., Pezo L., Lončar B., Kojić P., Jovanović A. A. A Comprehensive Review of Discrete Element Method Studies of Granular Flow in Static Mixers. *Processes*. 2025. Vol. 13(11). 3522. DOI: 10.3390/pr13113522
20. Bridgwater J. Mixing of powders and granular materials by mechanical means – A perspective. *Particuology*. 2012. Vol. 10 (4). P. 397–427. DOI: 10.1016/j.partic.2012.06.002
21. Алієв Е. Б. *Чисельне моделювання процесів агропромислового виробництва: підручник*. Київ: Аграрна наука. 2023. 340 с. DOI: 10.31073/978-966-540-584-9

References

1. Kisilyov, R. V., Luzan, P. G., Amosov, V. V., & Vasylkovsky, M. O. (2025). Research on the influence of the design parameters of the mixer on the quality of the feed mixture preparation. *Central Ukrainian Scientific Bulletin. Technical Sciences: Scientific Collection*. Issue 12(43), Part 1. P. 187–194. DOI: 10.32515/2664-262X.2025.12(43).1.187-194 [in Ukrainian].
2. Kisilyov, R. V., Khmelovsky, V. S., Luzan, P. G., & Sysolina, I. P. (2020). Research on a two-section mixer for the preparation of balanced mixtures on cattle farms. *Design, production and operation of agricultural machinery: All-State Interdepartmental Scientific and Technical Collection*. Issue 50. P. 107–113. DOI: 10.32515/2414-3820.2020.50.107-113 [in Ukrainian].
3. Kisilov, R. V., Matveev, K. D., & Luzan, P. G. (2013). Research on the technological efficiency of mixing feed with a two-stage single-shaft combined mixer of periodic action. *Design, production and operation of agricultural machines: All-State Interdepartmental Scientific and Technical Proceedings*. Issue 43, part 2. P. 108–112. [in Ukrainian].
4. Dudin, V. Yu., & Govorukha, V. B. (2023). Justification of the design and technological parameters of a ribbon-screw mixer for bulk feed. *Design, production and operation of agricultural machines: All-State Interdepartmental Scientific and Technical Proceedings*. Issue 53. P. 112–121. DOI: 10.32515/2414-3820.2023.53.112-12 [in Ukrainian].
5. Kisilyov, R. V., Luzan, P. G., Machok, Yu. V., & Nesterenko, O. V. (2014). Research on the process of preparing feed mixtures for cattle using a combined mixer. *Design, production and operation of agricultural machines: All-State Interdepartmental Scientific and Technical Proceedings*. Issue 44. P. 20–24. [in Ukrainian].

6. Kupchuk, I., Yaropud, V., Hraniak, V., Poberezhets, J., Tokarchuk, O., Hon-ta,r V., & Didyk, A. (2021). Multicriteria compromise optimization of feed grain grinding process. *Przegląd el-ektrotechniczny*. Vol. 97 (11). P. 179–183. DOI: 10.15199/48.2021.11.33 [in English].
7. Xin, J. (2022). DEM Study on the Mixing Behavior of U-shaped Ribbon Mixers. *A thesis submitted in fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Philosophy*. 292 p. [in English].
8. Park, C., Kim, J., Landon, R.S., Lyu, B., Cho, H., & Moon, I. (2018). Novel evaluation method for the continuous mixing process of bimodal particles. *Powder Technology*. Vol. 344. P. 636–646. DOI: 10.1016/j.powtec.2018.12.052 [in English].
9. Bhalode, P., & Ierapetritou, M. (2020). A review of existing mixing indices in solid-based continuous blending operations. *Powder Technology*. Vol. 373. P. 195–209. DOI: 10.1016/j.powtec.2020.06.043 [in English].
10. Chandratilleke, G. R., Bridgwater, A. Yu, J., & Shinohara, K. (2012). A particle-scale index in the quantification of mixing of particles. *AIChE journal*. Vol. 58. P. 1099–1118. DOI: 10.1002/aic.12654 [in English].
11. Cho, M., Dutta, P., & Shim, J. (2017). A non-sampling mixing index for multicomponent mixtures. *Powder Technology*. Vol. 319. P. 434–444. DOI: 10.1016/j.powtec.2017.07.011 [in English].
12. Lemieux, M., Bertrand, F., Chaouki, J., & Gosselin, P. (2007). Comparative study of the mixing of free-flowing particles in a V-blender and a bin-blender. *Chemical Engineering Science*. Vol. 62. P. 1783–1802. DOI: 10.1016/j.ces.2006.12.012 [in English].
13. Aliiev, E. B., Koshulko, V. S., & Kocherezhko, N. V. (2023). Justification of the design and technological parameters of a rotary mixer of compound feeds of periodic action. *Technology, Energy, Transport of the Agricultural Industry*. Issue 3 (122). P. 5–13. DOI: 10.37128/2520-6168-2023-3-1 [in Ukrainian].
14. Biroun, M.H., Sorensen, E., Hilden, J.L., & Mazzei, L. (2023). CFD modeling of powder flow in a continuous horizontal mixer. *Powder Technology*. Vol. 428. 118843. DOI: 10.1016/j.powtec.2023.118843 [in English].
15. Pezo, M., Pezo, L., Jovanović, A., Lončar, B., & Čolović, R. (2016). DEM/CFD approach for modeling granular flow in the revolving static mixer. *Chemical Engineering Research and Design*. Vol. 109. P. 317–326. DOI: 10.1016/j.cherd.2016.02.003 [in English].
16. Shevchenko I., Aliyev E. Improving the efficiency of the process of continuous flow mixing of bulk components. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2020. Vol. 6/1 (108). P. 6–13. DOI: 10.15587/1729-4061.2020.216409 [in English].
17. Lee, S.J., & Hwang, S.-Y. (2025). Comparative Study to Evaluate Mixing Efficiency of Very Fine Particles. *Applied Sciences*. Vol. 15. P. 8712. DOI: 10.3390/app15158712 [in English].
18. Gevko, I. B., Dyachun, A. E.,& Tarasyuk, Yu. M. (2014). Results of experimental research on the quality of mixing of feed mixtures by screw conveyor - mixer. *Bulletin of the Zhytomyr National Agroecological University*. Issue 2. P. 309–315. [in Ukrainian].
19. Pezo, M., Pezo, L., Lončar, B., Kojić, P., & Jovanović, A. A. (2025). A Comprehensive Review of Discrete Element Method Studies of Granular Flow in Static Mixers. *Processes*. Vol. 13(11). 3522. DOI: 10.3390/pr13113522 [in English].
20. Bridgwater, J. (2012). Mixing of powders and granular materials by mechanical means – A perspective. *Particuology*. Vol. 10 (4). P. 397–427. DOI: 10.1016/j.partic.2012.06.002 [in English].
21. Aliiev, E. B. (2023). *Numerical modeling of agroindustrial production processes: textbook*. Kyiv: Agrarian Science. DOI: 10.31073/978-966-540-584-9 [in Ukrainian].

Elchyn Aliiev, Professor, DSc. Senior Researcher
Ruslan Ponomarenko, recipient of the scientific degree of Doctor of Philosophy
Dnipro State Agrarian and Economic University, Dnipro, Ukraine

Results of Preliminary Studies of a Y-Shaped Feed Material Mixer

The quality of feed mixture preparation is a determining factor in livestock efficiency, as the uniform distribution of components directly affects the nutritional value and balance of the feed. This article presents the results of preliminary studies on the mixing process of feed materials in a Y-shaped mixer with controllable operating modes. The design and technological scheme of the mixer and its operating principle are justified. To analyze the physical patterns of the process, numerical modeling was used combining computational fluid dynamics and discrete element methods (CFD–DEM) in the Simcenter Star-CCM+ environment. The influence of geometric and operational parameters on the mixing kinetics and the mixture homogeneity coefficient was investigated. Rational values of the main parameters were determined, ensuring a homogeneity coefficient of 0.95 with minimal processing time. A laboratory test bench was designed and manufactured, and a methodology for experimental studies was developed, forming the basis for further optimization of the design and assessment of the energy efficiency of the Y-shaped feed mixer.

feed materials, mixer, mixture homogeneity, CFD–DEM modeling, design parameters, experimental studies

Одержано (Received) 11.02.2026 *Прорецензовано (Reviewed) 25.02.2026*
Прийнято до друку (Approved) 01.04.2026