**Алієв Е. Б.**

д.т.н., старший дослідник

Пономаренко Р.Г.

аспірант

**Дніпровський державний
аграрно-економічний
університет****Aliiev E**Doctor of Technical Sciences,
senior researcher**Ponomarenko R.**

postgraduate

**Dnipro State Agrarian and
Economic University****УДК 631.363:631.331.2:004.942****DOI: 10.37128/2306-8744-2025-2-7**

РЕЗУЛЬТАТИ ЧИСЕЛЬНОГО МОДЕЛЮВАННЯ Y-ПОДІБНОГО ЗМІШУВАЧА КОРМОВИХ ПРЕМІКСІВ

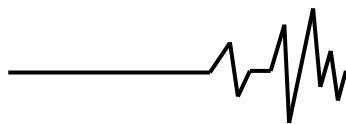
У роботі проведено комплексне чисельне моделювання процесу змішування кормових преміксів у Y-подібному змішувачі з використанням методу дискретних елементів (DEM) у поєднанні з обчислювальною гідродинамікою (CFD–DEM) у програмному середовищі Simcenter Star-CCM+. Метою дослідження було встановлення закономірностей впливу геометричних параметрів змішувача (кут злиття гілок, діаметр і довжина гілок) та режимних факторів (частота обертання змішувача) на швидкість досягнення заданої однорідності суміші, характер потоків частинок і енергетичні витрати.

Для моделювання використано тривимірну постановку задачі, де тверді частинки преміксу розглядалися як сферичні тіла з урахуванням пружності, тертя та відновлення при контактах між частинками та стінками змішувача за моделлю Герца–Мінділіна. Візуалізація процесу дозволила простежити формування багатопоточних траєкторій, локальні прискорення та уповільнення частинок, а також динаміку поступового вирівнювання концентрацій компонентів преміксу.

Дослідження проводилося за повнофакторним планом експерименту з чотирма факторами на трьох рівнях, а критерієм ефективності процесу обрано час t досягнення однорідності суміші $h = 0,95$. За результатами моделювання побудовано рівняння регресії другого порядку та проведено статистичну оцінку значущості факторів за критеріями Стюдента та Фішера. Аналіз показав, що найбільший вплив на швидкість досягнення однорідності мають частота обертання змішувача та кут злиття гілок, що обумовлено активною циркуляцією потоків, турбулентністю та ефективним перетином компонентів преміксу. Діаметр і довжина гілок проявляють менший нелінійний вплив: надмірне збільшення цих параметрів може створювати «мертві зони» і знижувати інтенсивність змішування. Перехресні взаємодії факторів підтверджують комплексний характер впливу геометрії та режиму на ефективність процесу.

За умов компромісної оптимізації, спрямованої на мінімізацію часу досягнення однорідності та одночасне збільшення об'єму змішувача, визначено раціональні параметри Y-подібного змішувача: довжина гілок $L = 371$ мм, діаметр $D = 186$ мм, кут злиття $\gamma = 46^\circ$, частота обертання $n = 22$ об/хв. При цьому час досягнення однорідності складає 69 с.

Ключові слова: Y-подібний змішувач, кормові премікси, чисельне моделювання, CFD–DEM, однорідність суміші, регресійний аналіз, геометричні параметри, частота обертання, оптимізація.



Вступ. У сучасних умовах розвитку тваринництва особливого значення набуває забезпечення високої якості та однорідності кормових преміксів. Від рівномірності розподілу мікродобавок у складі преміксу безпосередньо залежать продуктивність тварин, ефективність засвоєння поживних речовин, а також економічні показники виробництва [1]. Традиційні конструкції змішувачів, що широко застосовуються у преміксному виробництві, не завжди гарантують швидке досягнення необхідної однорідності, особливо при використанні багатокомпонентних сумішей із різними фізико-механічними властивостями частинок [2–4].

Проблема підвищення ефективності процесу змішування преміксів полягає у виборі такої конструкції змішувального обладнання, яка б забезпечувала мінімальний час досягнення заданого ступеня однорідності за умов низьких енерговитрат. Серед перспективних рішень – застосування змішувачів із нетрадиційною геометрією робочої камери, зокрема Y(V)-подібних конструкцій, що створюють додаткові потоки матеріалу та покращують динаміку взаємодії частинок [5–6].

Чисельне моделювання є ефективним інструментом дослідження процесів змішування преміксів, оскільки дозволяє прогнозувати поведінку сипких середовищ у робочій камері змішувача, визначати вплив геометричних параметрів та режимів роботи на кінцевий результат, а також знижує потребу у дорогих експериментальних дослідженнях. У цьому контексті актуальним є проведення чисельного аналізу роботи Y-подібного змішувача кормових преміксів та визначення його переваг і потенційних обмежень у порівнянні з традиційними рішеннями.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Останнє десятиріччя позначене активним розвитком чисельних підходів до вивчення процесів змішування кормових преміксів. Найбільш поширеними методами є дискретних елементів (DEM) та поєднання DEM із рідинними моделями (CFD–DEM) для врахування аеродинамічних ефектів, а також RANS/LES-моделювання газової фази у випадках пневмотранспорту та псевдозрідження [7–13]. У дослідженнях, присвячених барабанним, шнековим та V-подібним змішувачам преміксів, детально описано еволюцію структури потоків, механізми перенесення частинок (ковзання, каскадування, конвекція), а також залежності часу досягнення однорідності від рівня заповнення, швидкості обертання/подачі, гранулометрії та коефіцієнтів тертя. Для оцінки ефективності процесу широко

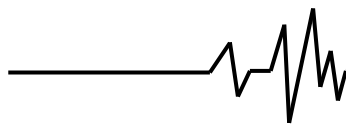
застосовуються індекси однорідності Лейсі й Данквертса, коефіцієнти варіації та інформаційні метрики на основі гістограм складу [14–16].

У преміксному виробництві окремо вивчався вплив різномірності компонентів (щільність, розмір, форма, вологість, наявність зв'язуючих добавок, таких як меляса чи олії) на сегрегацію та повторну реміксацію, а також на енергетичні витрати і зношування робочих органів. Значна увага приділялася оптимізаційним планам експериментів (Бокса–Бенкена, центрально-композиційним) і побудові поверхонь відгуку для визначення раціональних параметрів режимів і геометрії змішувачів. Разом із тим більшість досліджень зосереджена на традиційних конфігураціях камер; нетрадиційні топології, що забезпечують формування багатопоточних траєкторій руху частинок, вивчені значно менше.

Y-подібні змішувачі преміксів, близькі за ідеологією до V-подібних та розгалужених камер, становлять інтерес завдяки здатності формувати роздільні потоки з подальшим їхнім злиттям і зсувом, що потенційно прискорює дисперсне та конвективне змішування. У суміжних галузях (порошкова технологія, фармацевтика, виробництво добрив) показано, що ефективність таких змішувачів істотно залежить від кута злиття гілок, співвідношення поперечних перерізів, наявності напрямних чи перегородок, а також режимів збудження (обертання, вібрація, пульсації подачі). Проте систематичних досліджень саме для кормових преміксів із великою різницею гранулометрії та схильністю до злипання практично немає.

Невирішеними залишаються: (i) узгоджені критерії масштабування від лабораторних установок до промислових змішувачів; (ii) параметризація контактних моделей у DEM для вологих, крихких і волокнистих частинок преміксів; (iii) валідація CFD–DEM для умов реальних навантажень і ступенів заповнення камери; (iv) оцінка балансу «однорідність – енергоспоживання – зношування» з урахуванням довговічності обладнання. Також бракує відкритих експериментальних баз даних для калібрування чисельних моделей і порівняння різних геометрій за єдиними метриками.

Таким чином, попри значний прогрес у чисельному моделюванні та оптимізації традиційних змішувачів, Y-подібні конфігурації залишаються недостатньо дослідженими для задач преміксного виробництва. Це зумовлює актуальність проведення чисельного аналізу роботи Y-подібного змішувача кормових преміксів із фокусом на впливі геометричних параметрів (кут злиття, співвідношення гілок,



наявність напрямних елементів) і режимів роботи на динаміку змішування, сегрегацію та енергетичні показники, а також на подальшу експериментальну валідацію отриманих результатів.

Мета та завдання дослідження.

Встановити закономірності процесу змішування у Y-подібному змішувачі кормових преміксів на основі чисельного моделювання та здійснити оцінку його ефективності.

Викладення основного матеріалу.

Чисельне моделювання процесу змішування у Y-подібному змішувачі кормових преміксів проводилося в програмному середовищі Simcenter Star-CCM+, яке забезпечує реалізацію багатофізичних розрахунків на основі методів обчислювальної гідродинаміки (CFD) та моделювання дискретних елементів (DEM) [17–18].

Для побудови розрахункової сітки використовувалися генератори поверхневої та триммер-сітки, що дозволило досягти оптимального балансу між точністю відтворення складної геометрії змішувача та обчислювальною ефективністю. Поліедрична триммер-сітка забезпечила коректне відображення особливостей руху частинок у зоні злиття гілок та в основній камері змішувача преміксів, а також локальне згущення у зонах підвищеної турбулентності та інтенсивного контакту гранул зі стінками.

У складі фізичних моделей було застосовано комплекс наступних підходів: газову фазу описували як середовище з постійною густиною з урахуванням дії градієнтів тиску та сили тяжіння; для забезпечення стійкості розрахунків застосовувалися моделі градієнтів та інтерполяції рішення. Обчислення виконувалися у тривимірній постановці, у режимі нестационарного неявного розв'язання. Для газової фази використовувалася ламінарна модель течії, що дозволяло зосередитись на динаміці руху частинок преміксу, які описувалися методом DEM.

Тверду дисперсну фазу моделювали із застосуванням лагранжевого підходу до багатофазних середовищ, що передбачав відстеження траєкторії кожної окремої частинки з урахуванням її часу перебування у розрахунковій області. Частинки вважалися сферичними, з постійною густиною, а також з урахуванням впливу градієнта тиску та сили тяжіння.

Для опису багатофазної взаємодії враховували: міжфазні сили DEM між частинками преміксу та газовою фазою; сили опору, включно з опором коченню при контакті частинок; контактну модель Герца–Міндліна, що описує сили пружності, тертя та відновлення під час зіткнень частинок між

собою та зі стінками змішувача.

Постановка задачі чисельного моделювання Y-подібного змішувача кормових преміксів наведена на рис. 1.

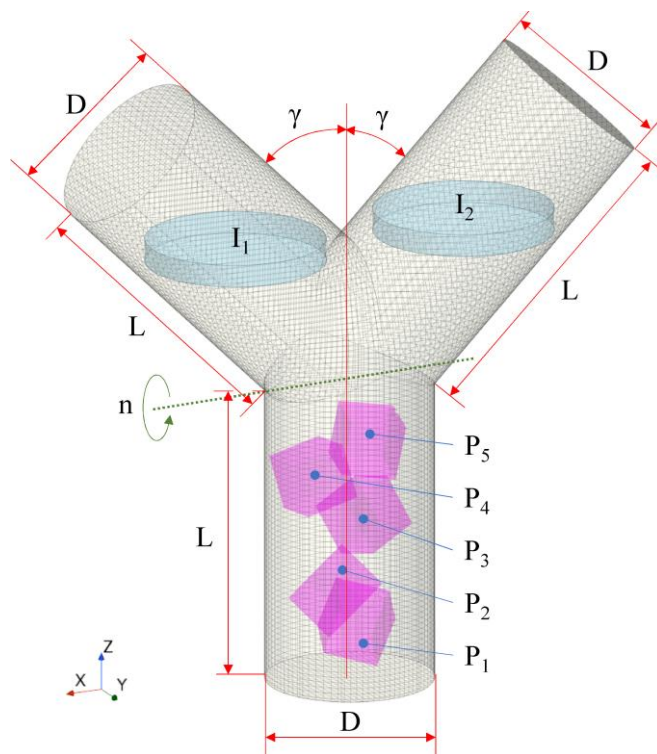
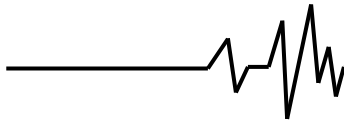


Рис. 1. Постановка задачі чисельного моделювання

Для опису поведінки системи застосовувався підхід CFD–DEM, де повітряне середовище моделювалося рівняннями Нав'є–Стокса з використанням моделі турбулентності $k-\epsilon$, а рух і взаємодія твердих частинок кормових преміксів описувалися методом дискретних елементів.

Геометрична модель Y-подібного змішувача передбачала можливість варіювання кута злиття гілок γ (30° , 45° , 60°) та їх діаметра D (0,1 м, 0,15 м, 0,2 м) поперечного перерізу і довжини L (0,2 м, 0,3 м, 0,4 м). Для спрощення моделювання було прийнято два компонента кормового преміксу однакової кількості. Частинки преміксів розглядалися як жорсткі сферичні тіла з діаметрами в діапазоні 1 мм і густиною 1200 кг/м^3 . Їхні контакти описувалися моделлю Герца–Міндліна з урахуванням сил пружності, тертя та відновлення при зіткненнях. На вході змішувача задавалася швидкість подачі частинок преміксу через інжектори I_1 та I_2 , стінки вважалися абсолютно жорсткими. Обертання відбувалось навколо геометричного центру Y-подібного змішувача з заданою частотою n (10 об/хв, 20 об/хв, 30 об/хв). Тривалість симуляції складала 156 с (6 с – завантаження, 150 с – змішування). В нижній



частини змішувача встановлені п'ять відбірників проб Р₁–Р₅. Критерієм досліджень є коефіцієнт однорідності суміші, який визначався кожні 6 с наступним чином:

$$h = 1 - \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{|V_{1i} - V_{2i}|}{V_{1i} + V_{2i}}, \quad (1)$$

де V_{1i} – маса компонента 1 у відбірнику проби Р₁; V_{2i} – маса компонента 2 у відбірнику проби Р₁; $N = 5$ – кількість відбірників проб Р₁–Р₅.

На рис. 2 представлено візуалізацію процесу завантаження компонентів кормового преміксу у Y-подібний змішувач. На схемі показано послідовність подачі сировинних

інгредієнтів та їх первинне розташування у робочому об'ємі змішувача. Це дозволяє простежити початковий розподіл частинок перед початком інтенсивного перемішування. Безпосередньо сам процес змішування подано на рис. 3. На ньому відображено динаміку переміщення та взаємодії частинок у внутрішньому просторі змішувача, що дає змогу оцінити характер утворення потоків та поступове вирівнювання концентрацій. Також наведені проміжні розподіли компонентів, які ілюструють перехід від початкової неоднорідності до досягнення однорідної суміші.

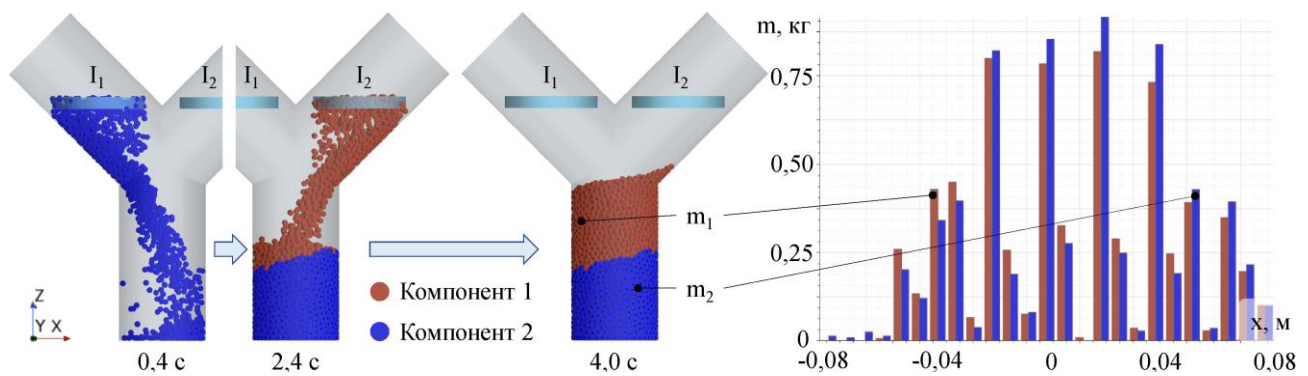


Рис. 2. Візуалізація процесу завантаження компонентів кормового преміксу в Y-подібний змішувач

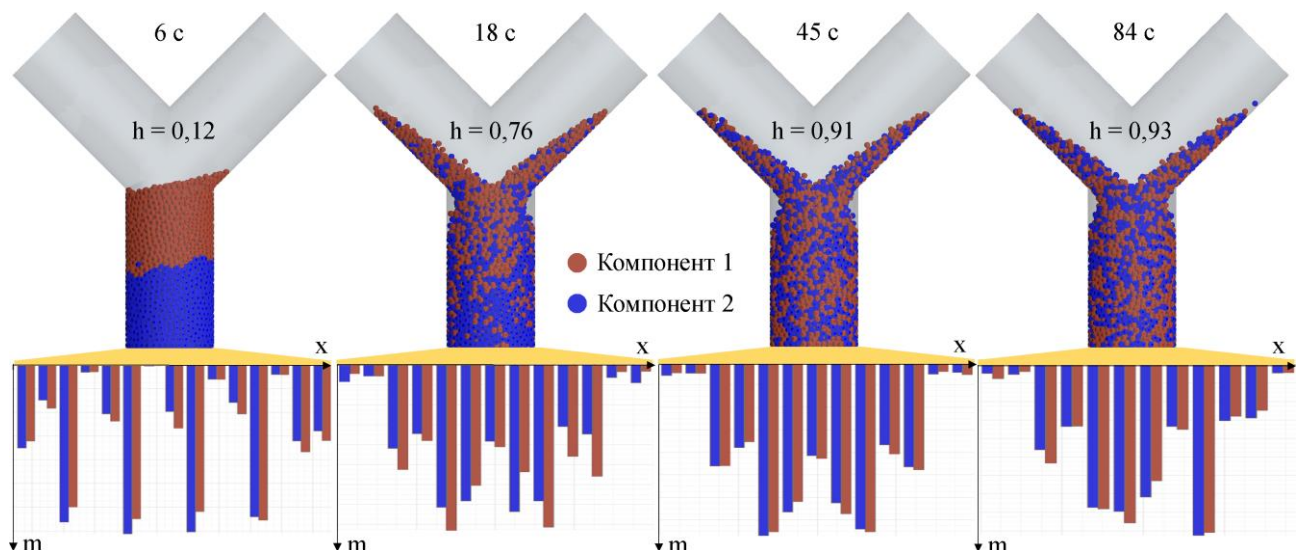


Рис. 3. Візуалізація процесу змішування компонентів кормового преміксу в Y-подібний змішувач

Візуалізація розподілу швидкостей частинок під час змішування кормового преміксу наведена на рис. 4. На рисунку показано характерні потоки матеріалу в камері Y-подібного змішувача, зони прискорення та уповільнення частинок, а також ділянки інтенсивного взаємного перемішування. Така

візуалізація дозволяє оцінити ефективність створення багатопоточних траєкторій руху і локальні особливості динаміки компонентів преміксу під дією обертання та турбулентних потоків.

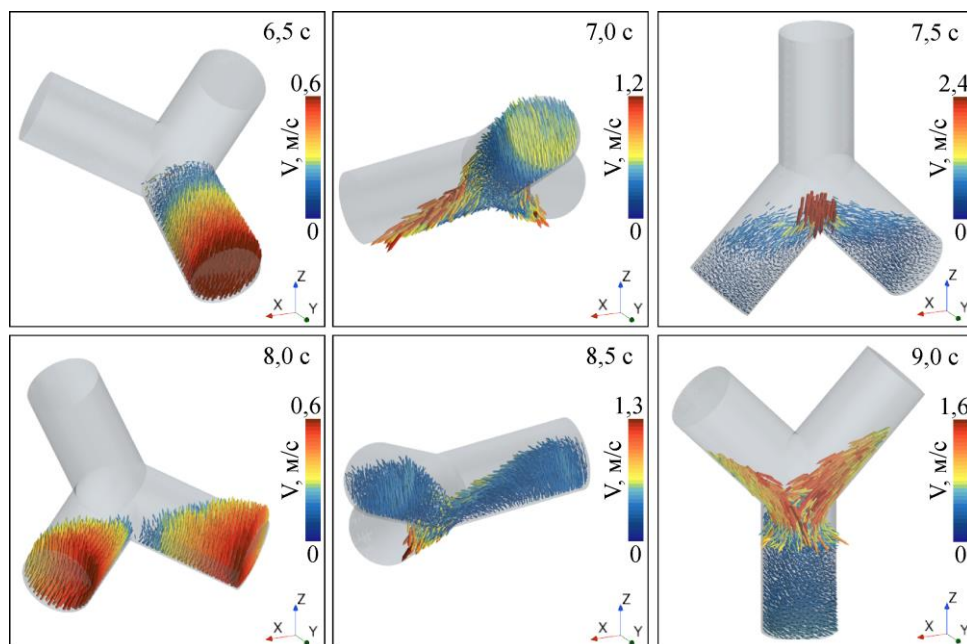
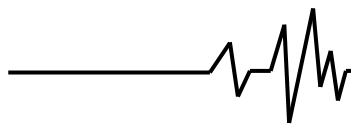


Рис. 4. Візуалізація розподілу швидкостей частинок під час змішування кормового преміксу в Y-подібний змішувач

Динаміка зміни однорідності суміші і енергії змішування представлена на рис. 5. Тут наведено часову криву коефіцієнта однорідності для контрольних зон P_1 – P_5 , що ілюструє кінетику процесу змішування у робочій

камері. Аналіз цих кривих дозволяє визначити момент досягнення стабільного рівня однорідності (0,95) та оцінити витрати енергії Y-подібного змішувача для кормових преміксів.

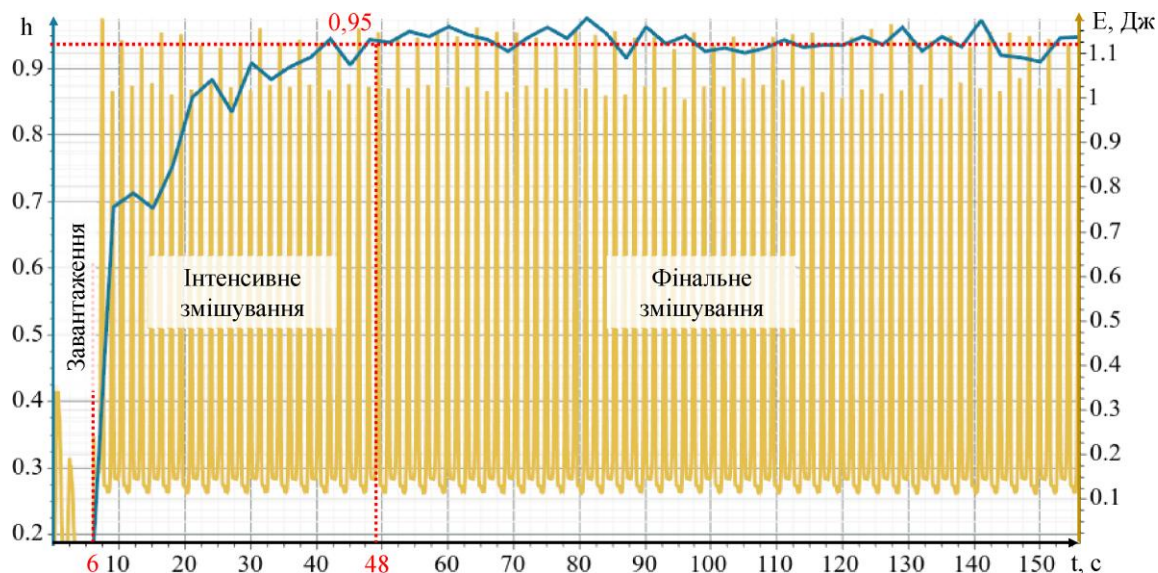
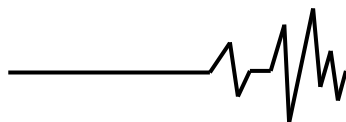


Рис. 5 Динаміка зміни однорідності суміші і енергії змішування кормового преміксу в Y-подібний змішувач

З рис. 5 чітко видно відповідні часові зони роботи Y-подібного змішувача: завантаження, інтенсивне змішування та фінальне вирівнювання суміші. На початковому етапі завантаження відбувається формування початкового розподілу компонентів преміксу у камері змішувача. Під час інтенсивного

змішування спостерігається активна циркуляція частинок, формування багатопоточних потоків, інтенсивні зіткнення та конвективне перемішування, що сприяє швидкому наближенню до однорідного стану. Фінальна фаза змішування характеризується уповільненням динаміки, коли концентрації



компонентів поступово стабілізуються у всіх контрольних зонах, і досягається заданий рівень однорідності (0,95).

Деякі комбінації геометричних розмірів Y-подібного змішувача, які є факторами досліджень наведені на рис. 6.

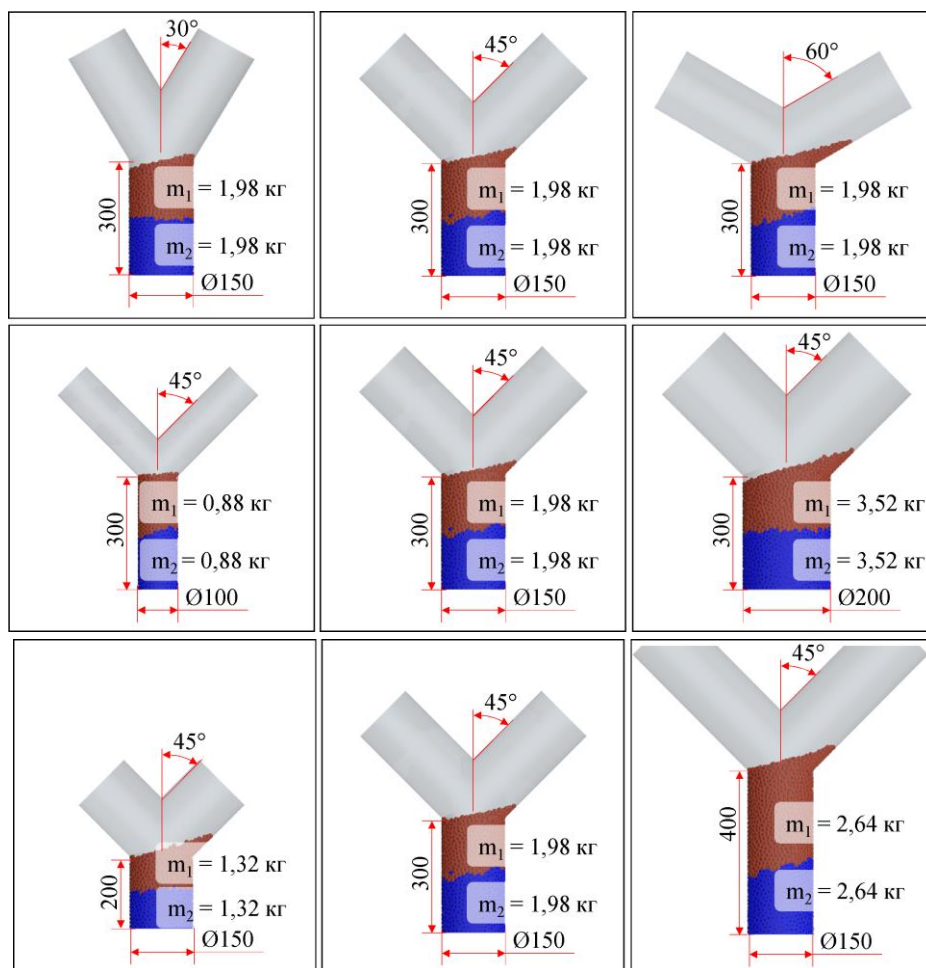


Рис. 6 Деякі комбінації геометричних розмірів Y-подібного змішувача

Дослідження проведено за повнофакторним планом експерименту для чотирьох факторів, кожен з яких розглядався на трьох рівнях. В якості критерію ефективності процесу змішування обрано час t , за який досягається заданий рівень однорідності суміші $h = 0,95$.

На основі отриманих результатів було побудовано рівняння регресії другого порядку, що описує залежність часу досягнення однорідності від змінних факторів. Статистична обробка даних включала визначення незначущих коефіцієнтів регресії за допомогою критерію Стюдента, що дозволило спростити модель та залишити лише значущі впливи факторів. Для перевірки адекватності отриманої моделі використано критерій Фішера (F-тест), який дозволяє оцінити відповідність моделі експериментальним даним і наявність випадкових помилок.

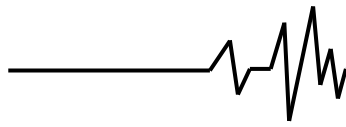
Такий підхід забезпечує точне кількісне описання впливу геометричних і режимних

параметрів Y-подібного змішувача на швидкість досягнення однорідності кормових преміксів. В закодованому вигляді залежність часу досягнення 0,95 однорідності суміші від факторів досліджень має вигляд:

$$\begin{aligned}
 t = & 52,2222 + 8,5 x_1 - 0,314815 x_1^2 + \\
 & + 10,6852 x_2 + 2,08333 x_1 x_2 + 5,35185 x_2^2 - \\
 & - 1,81481 x_3 + 0,111111 x_1 x_3 + 0,222222 x_2 x_3 + \\
 & + 9,96296 x_3^2 - 4,18519 x_4 - 0,0555556 x_1 x_4 + \\
 & + 0,0833333 x_2 x_4 + 0,0277778 x_3 x_4 + 7,40741 x_4^2,
 \end{aligned} \quad (2)$$

де x_1 – закодоване значення довжин гілок Y-подібного змішувача L ; x_2 – закодоване значення діаметрів поперечного перерізу гілок Y-подібного змішувача D ; x_3 – закодоване значення кута злиття гілок γ ; x_4 – закодоване значення частоти обертання змішувача n .

Результати регресійного аналізу, проведеного у Wolfram Cloud, наведені в табл. 1.



Таблиця 1 – Регресійний аналіз залежності часу досягнення 0,95 однорідності суміші від факторів досліджень (2)

Коефіцієнт регресії	Значення коефіцієнта	Стандартна похибка	Коефіцієнт Стюдента	Асимптотична значимість
k ₀₀	52,2222	0,200192	260,861	3,4575·10 ⁻¹⁰¹
k ₁₀	8,5	0,081728	104,004	6,67368·10 ⁻⁷⁵
k ₂₀	10,6852	0,081728	130,741	1,98554·10 ⁻⁸¹
k ₃₀	-1,81481	0,081728	-22,2056	2,48352·10 ⁻³²
k ₄₀	-4,18519	0,081728	-51,2088	7,37463·10 ⁻⁵⁵
k ₁₂	2,08333	0,100096	20,8134	1,05273·10 ⁻³⁰
k ₁₃	0,111111	0,100096	1,11005	0,271007
k ₁₄	-0,05556	0,100096	-0,55502	0,580755
k ₂₃	0,222222	0,100096	2,22009	0,029852
k ₂₄	0,083333	0,100096	0,832536	0,408109
k ₃₄	0,027778	0,100096	0,277512	0,782255
k ₁₁	-0,31482	0,141557	-2,22395	0,029579
k ₂₂	5,35185	0,141557	37,8071	1,89768·10 ⁻⁴⁶
k ₃₃	9,96296	0,141557	70,3813	8,2484·10 ⁻⁶⁴
k ₄₄	7,40741	0,141557	52,3281	1,83071·10 ⁻⁵⁵

Дисперсійний аналіз рівняння (1), ефект моделі є статистично значущим – зміни проведеного у Wolfram Cloud, наведено на факторів дослідження суттєво впливають на табл. 2. $F_{\text{роз}} = 7024,7 \gg F_{\text{табл}} = 2,04$ означає, що однорідність.

Таблиця 2 – Дисперсійний аналіз залежності часу досягнення 0,95 однорідності суміші від факторів досліджень (2)

Показники	DF	SS	MS	Критерій Фішера
Модель	15	37999	2533	7024,7
Помилка	66	23,8056	0,36069	2,04
Нескоригована сума	81	380018	—	—
Скоригована сума	80	14664,9	—	—

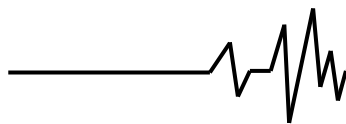
Порівнюючи розрахований коефіцієнт Стюдента (табл. 1) із табличним значенням $t(0,05, 80) \approx 1,990$ відхиляємо незначущі коефіцієнти регресії і розкодуємо рівняння (2):

$$\begin{aligned} t = & 193,861 - 0,566852 D + 0,00214074 D^2 \\ & - 4,15062 \gamma + 0,000296296 D \gamma + \\ & + 0,0442798 \gamma^2 + 0,0413889 L + \\ & + 0,000416667 D L - 0,0000314815 L^2 - \\ & - 3,38148 n + 0,0740741 n^2. \end{aligned} \quad (3)$$

Графічна інтерпретація залежності (3) наведена на рисунку 7.

Діаметр гілок D проявляє помірний вплив: лінійна складова показує, що збільшення діаметру спочатку зменшує час змішування, оскільки більший переріз забезпечує менший опір руху суміші і кращу циркуляцію частинок. Проте квадратичний член свідчить про наявність точки, після якої подальше збільшення діаметру починає зменшувати ефективність, що пояснюється

менш інтенсивним перемішуванням у центральній зоні великих гілок та можливістю утворення «мертвих зон». Кут злиття гілок γ має суттєвий вплив: збільшення кута лінійно скорочує час змішування, адже ширше розгалуження гілок сприяє більш ефективному розподілу суміші і посиленню турбулентності на стику потоків. Квадратичний член відображає фізичне обмеження – при дуже великих кутах змішувальний ефект стабілізується або навіть слабшає через недостатнє перетинання потоків і локальне переважання ламінарного руху. Довжина гілок L впливає на час змішування позитивно, тобто його збільшення трохи подовжує процес. Це пояснюється тим, що довші гілки збільшують шлях, який повинні пройти частинки, і водночас зменшують турбулентність на кінцевих ділянках. Квадратичний член практично компенсує лінійний вплив, що свідчить про слабку нелінійність, а перехресна взаємодія з діаметром D показує, що геометричні



співвідношення між параметрами визначають локальні зони інтенсивного змішування. Найсильніший ефект спостерігається від частоти обертання n . Лінійний член показує, що збільшення частоти обертання змішувача значно зменшує час досягнення однорідності, оскільки швидше обертання інтенсифікує перемішування і створює більшу турбулентність. Квадратичний член свідчить про наявність фізичного обмеження: надмірне збільшення частоти може призводити до утворення завихрень і локальної сепарації компонентів, через що ефективність змішування зменшується. Перехресні члени $D \cdot L$ показують, що ефект кожного геометричного параметра не ізольований, а залежить від взаємодії з іншими: оптимальні співвідношення діаметру, довжини і кута забезпечують максимальну інтенсивність змішування та мінімальний час досягнення однорідності. Таким чином, закономірності у рівнянні відображають фундаментальні фізичні процеси – взаємодію потоків частинок, турбулентність, циркуляцію в гілках змішувача та геометричні обмеження, що визначають ефективність процесу.

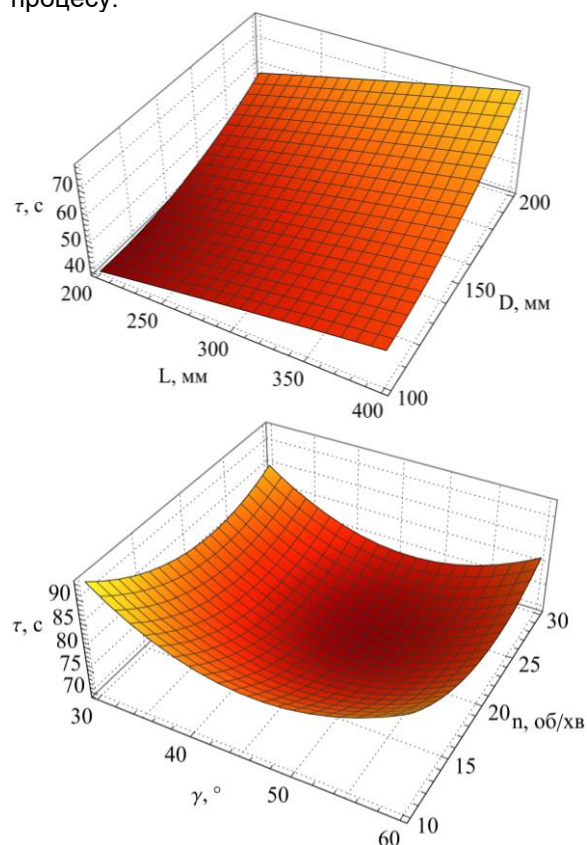


Рис. 7. Залежність часу досягнення 0,95 однорідності суміші у Y-подібному змішувачі τ від довжини гілок L , діаметрів поперечного перерізу гілок D , кута злиття гілок γ і частоти обертання змішувача n

Вирішуючи компромісну задачу, яка зводиться до мінімізації часу досягнення 0,95 однорідності суміші і збільшення об'єму гілок Y-подібного змішувача $L \cdot \pi(D/2)^2$, проведеного у Wolfram Cloud, отримані раціональні значення факторів досліджень: $L = 371$ мм, $D = 186$ мм, $\gamma = 46^\circ$, $n = 22$ об/хв. При цьому $\tau = 69$ с.

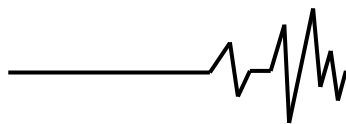
Висновки та перспективи подальших досліджень. Проведене чисельне моделювання процесу змішування кормових преміксів у Y-подібному змішувачі дозволило встановити закономірності впливу геометричних параметрів і режимних факторів на швидкість досягнення однорідності суміші. Аналіз рівняння регресії показав, що найбільший ефект на зменшення часу досягнення 0,95 однорідності мають частота обертання змішувача та кут злиття гілок, що зумовлено посиленням турбулентності, активною циркуляцією потоків та ефективним перетином компонентів преміксу. Діаметр гілок та їх довжина впливають меншою мірою і виявляють нелінійний ефект: надмірне збільшення D або L може призводити до утворення «мертвих зон» і зниження інтенсивності змішування. Перехресні взаємодії факторів підкреслюють, що ефективність процесу визначається комплексною взаємодією геометрії та динаміки системи.

Раціональні параметри змішувача, отримані за компромісною задачею мінімізації часу досягнення 0,95 однорідності і одночасного збільшення об'єму гілок, становлять: довжина гілок $L = 371$ мм, діаметр $D = 186$ мм, кут злиття $\gamma = 46^\circ$, частота обертання $n = 22$ об/хв, при цьому час досягнення однорідності складає 69 с. Це дозволяє ефективно спланувати конструкцію змішувача для оптимального поєднання продуктивності та якості змішування.

Перспективи подальших досліджень полягають у розширенні моделі для багатокомпонентних преміксів з різною густиною та формою частинок, врахуванні ефектів адгезії та деформації частинок, а також у вивченні впливу змінних режимів обертання та пульсацій подачі. Додатково доцільно провести експериментальну верифікацію чисельних результатів та розробити методи адаптивного управління змішуванням для промислових Y-подібних змішувачів з метою підвищення однорідності та енергоефективності процесу.

Список використаних джерел

1. Rocha A.G., Montanhini R.N., Dilkin P., Tamiasso C.D., Mallmann C.A. Comparison of different indicators for the evaluation of feed mixing efficiency. *Animal Feed Science and Technology*, 2015, 209, 249–256. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2015.09.005>
2. Adusei-Bonsu M., Amanor I. N., Obeng G. Y., Mensah E. Performance evaluation



of mechanical feed mixers using machine parameters, operational parameters and feed characteristics in Ashanti and Brong-Ahafo regions, Ghana. *Alexandria Engineering Journal*, 2021, 60 (5), 4905–4918. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.aej.2021.03.061>

3. Angeles E.P. Analysis of Feed Mixer Efficiencies of Commercial Feed Manufacturers in the Philippines from 2012 to 2016. *Philippine Journal of Veterinary and Animal Sciences*, 2018, 44 (2), 103–110.

4. Husein J., Issahaku G., Yussif B. Performance Evaluation of Poultry Mixer. *Current Journal of Applied Science and Technology*. 2024, 43 (6), 31–41. DOI: <https://doi.org/10.9734/cjast/2024/v43i64384>

5. Borotov A., Bekzhanov S., Nurjan D., Tursunov J., Tursunov Sh., Boykulov U., Ernazarov K., Karshiev F. U. Development of the construction of the feed mixer device of granulation line. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*, 2023, 1284, 012013. DOI: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1284/1/012013>

6. Chernovol M., Sviren M., Kisiliov R. Study of the process of preparing feeding mixtures using the composite mixer. *Agricultural Science and Practice*, 2018, 5 (1), 17–22. DOI: <https://doi.org/10.15407/agrisp5.01.017>

7. Hassanpour A., Ghadiri M. Discrete Element Method (DEM) Simulation of Powder Mixing Process. *Pharmaceutical Blending and Mixing*. 2015. DOI: <https://doi.org/10.1002/9781118682692.ch17>

8. Zuo Z., Gong S., Xie G., Zhang J. DEM simulation of binary mixing particles with different density in an intensive mixer. *Powder Technology*, 2021, 383, 454–470. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2021.01.064>

9. Li G., Zhang Z., Xiang J., Zhao H., Jiao F., Chen T., Li G. Evaluation of Mixing Process in Batch Mixer Using CFD-DEM Simulation and Automatic Post-Processing Method. *Processes*, 2024, 12(12), 2840. DOI: <https://doi.org/10.3390/pr12122840>

10. Kishida N., Nakamura H., Ohsaki S., Watano S. Surrogate model of DEM simulation for binary-sized particle mixing and segregation. *Powder Technology*, 2025, 455, 120811. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2025.120811>

11. Bertrand F., Leclaire L.-A., Levecque G. DEM-based models for the mixing of granular materials. *Chemical Engineering Science*, 2005, 60 (8–9), 2517–2531. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ces.2004.11.048>

12. Jadidi B., Ebrahimi M., Ein-Mozaffari F., Lohi A. A comprehensive review of the application of DEM in the investigation of batch solid mixers. *Rev Chem Eng*, 2023, 39(5), 729–764.

13. Shevchenko I., Aliiev E. Improving the efficiency of the process of continuous flow mixing of bulk components. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2020, 6/1 (108), 6–13. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.216409>

14. Aliiev E., Pavlenko S., Aliieva O., Morhun O. Accelerated biothermal composting of manure-compost mixture. *Agraarteadus, Journal of Agricultural Science*, 2021, XXXII (2), 169–181. DOI: <https://doi.org/10.15159/jas.21.30>

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

16. Алієв Е. Б., Павленко С. І. Симуляція процесу формування бурта і змішування компонентів компостної суміші однобарабанным аератором. *Вібрації в техніці та технологіях*, 2023, 2 (109): 30-39. DOI: <https://doi.org/10.37128/2306-8744-2023-2-4>.

17. Алієв Е.Б. Чисельне моделювання процесів агропромислового виробництва: підручник. Київ: Аграрна наука, 2023, 340 с. DOI: <https://doi.org/10.31073/978-966-540-584-9>

18. Алієв Е.Б., Миколенко С.Ю., Сова Н.А. та ін. Техніко-технологічне забезпечення безвідходної переробки зернової сировини у харчові продукти і корми: колективна монографія / за заг. ред. Е. Б. Алієва. Дніпро: ЛІПА. 2022, 192 с.

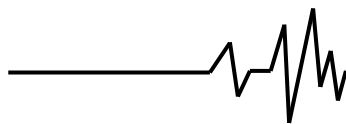
References

1. Rocha A.G., Montanhini R.N., Dilkin P., Tamiosso C.D., Mallmann C.A. (2015). Comparison of different indicators for the evaluation of feed mixing efficiency. *Animal Feed Science and Technology*, 209, 249–256. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2015.09.005>

2. Adusei-Bonsu M., Amanor I. N., Obeng G. Y., Mensah E. (2021). Performance evaluation of mechanical feed mixers using machine parameters, operational parameters and feed characteristics in Ashanti and Brong-Ahafo regions, Ghana. *Alexandria Engineering Journal*, 60 (5), 4905–4918. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.aej.2021.03.061>

3. Angeles E.P. (2018). Analysis of Feed Mixer Efficiencies of Commercial Feed Manufacturers in the Philippines from 2012 to 2016. *Philippine Journal of Veterinary and Animal Sciences*, 44 (2), 103–110.

4. Husein J., Issahaku G., Yussif B. (2024). Performance Evaluation of Poultry Mixer. *Current Journal of Applied Science and Technology*, 43 (6), 31–41. DOI: <https://doi.org/10.9734/cjast/2024/v43i64384>



5. Borotov A., Bekzhanov S., Nurjan D., Tursunov J., Tursunov Sh., Boykulov U., Ernazarov K., Karshiev F. U. (2023). Development of the construction of the feed mixer device of granulation line. IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science, 1284, 012013. DOI: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1284/1/012013>

6. Chernovol M., Sviren M., Kisiliov R. (2018). Study of the process of preparing feeding mixtures using the composite mixer. Agricultural Science and Practice, 5 (1), 17–22. DOI: <https://doi.org/10.15407/agrisp5.01.017>

7. Hassanpour A., Ghadiri M. (2015). Discrete Element Method (DEM) Simulation of Powder Mixing Process. Pharmaceutical Blending and Mixing. DOI: <https://doi.org/10.1002/9781118682692.ch17>

8. Zuo Z., Gong S., Xie G., Zhang J. (2021). DEM simulation of binary mixing particles with different density in an intensive mixer. Powder Technology, 383, 454–470. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2021.01.064>

9. Li G., Zhang Z., Xiang J., Zhao H., Jiao F., Chen T., Li G. (2024). Evaluation of Mixing Process in Batch Mixer Using CFD-DEM Simulation and Automatic Post-Processing Method. Processes, 12(12), 2840. DOI: <https://doi.org/10.3390/pr12122840>

10. Kishida N., Nakamura H., Ohsaki S., Watano S. (2025). Surrogate model of DEM simulation for binary-sized particle mixing and segregation. Powder Technology, 455, 120811. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2025.120811>

11. Bertrand F., Leclaire L.-A., Levecque G. (2005). DEM-based models for the mixing of granular materials. Chemical Engineering Science, 60 (8–9), 2517–2531. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ces.2004.11.048>

12. Jadidi B., Ebrahimi M., Ein-Mozaffari F., Lohi A. (2023). A comprehensive review of the application of DEM in the investigation of batch solid mixers. Rev Chem Eng, 39(5), 729–764.

13. Shevchenko I., Aliiev E. (2020). Improving the efficiency of the process of continuous flow mixing of bulk components. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 6/1 (108), 6–13. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.216409>

14. Aliiev E., Pavlenko S., Aliieva O., Morhun O. (2021). Accelerated biothermal composting of manure-compost mixture. AgrarTeadus, Journal of Agricultural Science, XXXII (2), 169–181. DOI: <https://doi.org/10.15159/jas.21.30>

15. Aliiev E. B., Koshulko V. S., Kocherezhko N. V. Obgruntuvannya konstruktyvno-tekhnolohichnykh parametriv rotnonoho zmishuvacha kombikormiv periodychnoyi diyi [Substantiation of the design

and technological parameters of a rotary mixer of compound feeds of periodic action]. Tekhnika, enerhetyka, transport APK, 2023, 3 (122), 5–13. DOI: <https://doi.org/10.37128/2520-6168-2023-3-1>. [in Ukrainian].

16. Aliiev E. B., Pavlenko S. I. Symulyatsiya protsesu formuvannya burta i zmishuvannya komponentiv kompostnoyi sumishi odnobarabannym aeratorom [Simulation of the process of forming a ridge and mixing the components of the compost mixture with a single-drum aerator]. Vibratsiyi v tekhnitsi ta tekhnolohiyakh, 2023, 2 (109): 30–39. DOI: <https://doi.org/10.37128/2306-8744-2023-2-4>. [in Ukrainian].

17. Aliiev E. B. Chysel'ne modelyuvannya protsesiv ahropromyslovoho vyrobnytstva: pidruchnyk [Numerical modeling of agroindustrial production processes: textbook]. Kyiv: Ahrarna nauka, 2023, 340 s. DOI: <https://doi.org/10.31073/978-966-540-584-9>. [in Ukrainian].

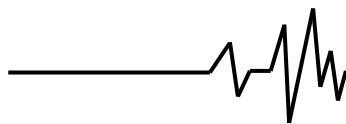
18. Aliiev E. B., Mykolenko S. YU., Sova N. A. ta in. Tekhniko-tekhnolohichne zabezpechennya bezvidkhodnoyi pererobky zernovoyi syrovyny u kharchovi produkty i kormy: kolektyvna monohrafiya [technical and technological support for waste-free processing of grain raw materials into food products and feed: collective monograph] / za zah. red. E. B. Aliyeva. Dnipro: LIRA. 2022, 192 s. [in Ukrainian].

RESULTS OF NUMERICAL SIMULATION OF A Y-SHAPED MIXER FOR FEED PREMIXES

A comprehensive numerical simulation of the mixing process of feed premixes in a Y-shaped mixer was carried out using the Discrete Element Method (DEM) combined with Computational Fluid Dynamics (CFD–DEM) in the Simcenter Star-CCM+ software environment. The aim of the study was to establish the patterns of influence of the mixer's geometric parameters (branch convergence angle, branch diameter, and branch length) and operating factors (mixer rotation speed) on the rate of achieving the target mixture uniformity, the flow behavior of particles, and energy consumption.

The simulation was performed in a three-dimensional setting, where solid premix particles were modeled as spherical bodies, taking into account elasticity, friction, and restitution during particle-to-particle and particle-to-wall contacts using the Hertz–Mindlin model. Visualization of the process made it possible to trace the formation of multi-stream trajectories, local accelerations and decelerations of particles, as well as the dynamics of the gradual leveling of premix component concentrations.

The study was conducted according to a



full-factorial experimental design with four factors at three levels, with the process efficiency criterion defined as the mixing time τ required to achieve mixture uniformity $h = 0.95$. Based on the simulation results, a second-order regression equation was obtained, and statistical evaluation of factor significance was carried out using Student's t -test and Fisher's F -test. The analysis showed that the mixer rotation speed and branch convergence angle have the greatest influence on the rate of achieving uniformity, which is explained by active flow circulation, turbulence, and effective intermixing of premix components. Branch diameter and length exhibited a smaller nonlinear effect: excessive increases in these parameters can create "dead zones" and reduce mixing intensity. Cross-factor interactions confirmed the

complex nature of the influence of geometry and operating conditions on process efficiency.

Through compromise optimization aimed at minimizing the mixing time while simultaneously increasing mixer capacity, the following rational parameters of the Y-shaped mixer were determined: branch length $L = 371$ mm, diameter $D = 186$ mm, convergence angle $\gamma = 46^\circ$, and rotation speed $n = 22$ rpm. Under these conditions, the mixing time to reach uniformity was 69 seconds.

Key words: Y-shaped mixer, feed premixes, numerical simulation, CFD–DEM, mixture uniformity, regression analysis, geometric parameters, rotation speed, optimization.

Відомості про авторів

Алієв Ельчин Бахтияр огли – доктор технічних наук, старший дослідник, професор кафедри інжинірингу технічних систем Дніпровського державного аграрно-економічного університету (вул. Сергія Єфремова, 25, м. Дніпро, Україна, 49000, e-mail: aliev@meta.ua, <https://orcid.org/0000-0003-4006-8803>)

Пономаренко Руслан Григорович – аспірант Дніпровського державного аграрно-економічного університету (вул. Сергія Єфремова, 25, м. Дніпро, Україна, 49000, e-mail: Ponomarenko240314@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0002-0282-8285>).

Elchyn Aliiev – Doctor of Technical Sciences, Senior Researcher, Professor of the Departments of Mechanization of Production Processes in Animal Husbandry of Dnipro State Agrarian and Economic University (St. S. Efremova, 25, Dnipro, Ukraine, 49000, e-mail: aliev@meta.ua, <https://orcid.org/0000-0003-4006-8803>).

Ruslan Ponomarenko – postgraduate of Dnipro State Agrarian and Economic University (St. S. Efremova, 25, Dnipro, Ukraine, 49000, e-mail: Ponomarenko240314@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0002-0282-8285>).