

4. Кудла Б. Я., Диня В. І., Дудка С. Д. [та ін.]. Формування індивідуальної продуктивності сої залежно від агротехнічних заходів в умовах Тернопільської області. *Таврійський науковий вісник*. 2024. № 140. С. 144–151.

5. Романько Ю. О., Романько А. Ю., Білокінь В. О., Бруньов М. І. Екологічна еластичність продуктивності сортів сої залежно від кліматичних факторів. *«Гончарівські читання»: матеріали Міжнародної наук.-прак. конф., присвяченої 91-річчю з дня народження доктора сільськогосподарських наук, професора Гончарова Миколи Дем'яновича, м. Суми, 25-26 травня 2020 р.* Суми, 2020. С. 41–42.

6. Mazur O., Mazur O., Tymoshchuk T., Didur I., Tsyhanskyi V. Study of legumerhizobia symbiosis in soybean for agroecosystem resilience. *Scientific Horizons*. 2024. № 27 (11). P. 68–89.

*Науковий керівник: В. Я. Іванюк, к. с.-г. н., доцент
Львівський національний університет ветеринарної медицини
та біотехнологій імені С. З. Гжицького*

УДК 631.363:531.3

**КЕРУВАННЯ ДЕФОРМАЦІЙНОЮ СТРУКТУРОЮ ПРОЦЕСУ
ЗМІШУВАННЯ КОРМОВИХ МАТЕРІАЛІВ
CONTROL OF DEFORMATION STRUCTURE IN FEED MIXING PROCESSES**

Ігор Купчук

*Вінницький національний аграрний університет
Вінниця, Україна*

Вступ. Процес змішування багатокомпонентних кормових матеріалів є визначальним етапом формування повнораціонних сумішей, від якого залежить рівномірність споживання поживних компонентів та ефективність годівлі. У класичних підходах змішування розглядається як кінетичний процес, що характеризується зміною статистичних показників однорідності суміші в часі [1]. При цьому основна увага приділяється кінематичним параметрам робочих органів, геометрії змішувачів і інтенсивності макроскопічного переміщення матеріалу.

Водночас у сучасних дослідженнях показано, що такий підхід є обмеженим, оскільки не враховує складну механіко-реологічну природу кормових матеріалів, які поєднують фрикційні, когезійні, волокнисті та в'язкопластичні компоненти [2]. У попередніх роботах встановлено, що процес змішування доцільно розглядати як поєднання механізмів перенесення та локальних зсувних деформацій, які формують просторову структуру суміші [3], а ефективність змішування визначається співвідношенням між зонами активної та пасивної деформації [4].

Постановка проблеми. У роботі [5] показано, що навіть у геометрично симетричних змішувачах у робочому об'ємі формується просторово неоднорідне поле локальних деформацій, унаслідок чого виникають зони з різною інтенсивністю зсуву. Зокрема, поряд із зонами інтенсивної деформаційної активації існують області з критично низьким рівнем зсувних деформацій, які фактично не беруть участі у процесі змішування та формують так звані застійні зони.

Як встановлено у [5], такі зони не є суто геометричними утвореннями, а мають механіко-технологічну природу і визначаються просторовим розподілом деформацій у матеріальному середовищі. Разом з тим у більшості існуючих підходів деформаційна структура процесу розглядається як похідна від кінематики робочого органу і не виступає об'єктом цілеспрямованого керування.

Це зумовлює протиріччя між необхідністю забезпечення рівномірного залучення матеріалу до процесу змішування та відсутністю методів керування просторовою структурою деформацій у робочому об'ємі.

Метою роботи є формування деформаційного підходу до керування процесом змішування кормових матеріалів та визначення принципів його реалізації на основі варіювання кінематичних параметрів руху робочого об'єму.

Основні результати дослідження. Запропонований деформаційний підхід передбачає інтерпретацію процесу змішування кормових матеріалів як формування деформаційної структури, що складається з взаємопов'язаних зон, які відрізняються інтенсивністю та характером локальних деформацій. У загальному випадку в робочому об'ємі змішувача можна виділити зони інтенсивних зсувних деформацій, у яких відбувається активне руйнування структур і перерозподіл компонентів, проміжні області з нестійким або періодичним деформаційним режимом, а також деформаційно неактивні області, у яких матеріал перебуває у квазіжорсткому стані та не зазнає ефективного перемішування. Таке представлення процесу дозволяє розглядати ефективність змішування як функцію просторового розподілу деформацій, що визначає ступінь залучення матеріалу до процесу перерозподілу компонентів.

Як показано у [3, 4], саме співвідношення між цими зонами визначає кінцеву однорідність суміші, енерговитрати процесу та його відтворюваність. При цьому наявність порогу текучості та нелінійної реологічної поведінки кормових матеріалів призводить до локалізації деформацій і обмеження активного об'єму змішування [2].

У роботі [4] встановлено, що енерговитрати процесу визначаються співвідношенням між пороговою та в'язкою складовими напруження зсуву, що додатково підкреслює визначальну роль деформаційної структури процесу.

На відміну від існуючих підходів, у даній роботі деформаційна структура процесу змішування розглядається як керований параметр. Керування передбачає цілеспрямовану зміну:

- просторового розподілу зон зсуву;
- інтенсивності локальних деформацій;
- часової повторюваності деформаційних впливів.

Фізично це може бути реалізовано за рахунок локального збурення потоку матеріалу, зміни умов взаємодії матеріалу з робочими поверхнями та формування додаткових зон підвищених зсувних деформацій без необхідності підвищення загальної енергоємності процесу.

Для подальшого дослідження закономірностей формування та керування деформаційною структурою процесу змішування розробляється лабораторна установка (рис. 1), що забезпечує можливість варіювання кінематичних параметрів руху змішувального об'єму та створення контрольованих режимів механічного збурення матеріалу.

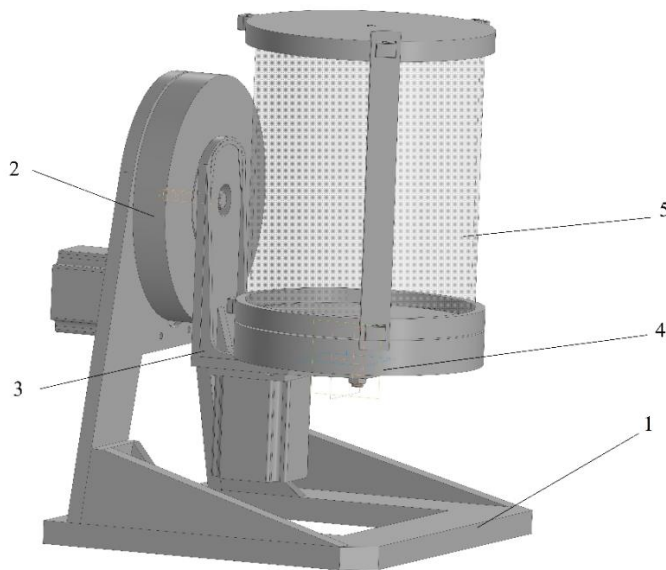


Рис. 1 - Модель лабораторної установки: 1 – остов; 2 – поворотний механізм; 3 – поворотна платформа; 4 – приводний механізм; 5 – робоча ємність.

Конструктивною основою установки є остов 1, який виконує функцію несучої рами та забезпечує жорстке кріплення всіх елементів системи. На остові змонтовано поворотний механізм 2, призначений для зміни кута нахилу поворотної платформи 3. Така кінематична схема дозволяє варіювати просторове положення робочої ємності відносно вертикальної осі та змінювати характер гравітаційно-інерційної взаємодії матеріалу.

На поворотній платформі 3 встановлена робоча ємність 5, яка приводиться в рух за допомогою приводу 4. Приводний механізм забезпечує обертання ємності з регульованими параметрами, що у поєднанні зі зміною кута її нахилу дозволяє реалізувати складний просторовий рух матеріалу.

Запропонована установка є базовою конструкцією змішувача модульного типу, яка передбачає можливість встановлення у робочому об'ємі різних робочих органів (шнеків, стрічок, валів, ребер та інших елементів). Це дозволяє змінювати характер взаємодії матеріалу з робочими поверхнями та формувати різні режими локальних деформацій у процесі змішування.

Принцип роботи установки полягає у поєднанні обертального руху робочої ємності з її просторовим переорієнтуванням, що забезпечує формування змінних у часі та просторі режимів навантаження матеріалу. У результаті створюються умови для керованого формування деформаційної структури - від локалізованих зон інтенсивного зсуву до більш рівномірно розподілених деформаційних полів у робочому об'ємі.

Розроблена установка розглядається як експериментальна платформа для дослідження впливу кінематичних параметрів руху та конфігурації робочих органів на структуру деформацій і ефективність змішування, а також для подальшого обґрунтування методів керування процесом.

Висновки. Встановлено, що процес змішування кормових матеріалів доцільно розглядати як формування деформаційної структури, яка визначає ступінь залучення матеріалу до перерозподілу компонентів. Показано, що ефективність змішування пов'язана зі співвідношенням зон інтенсивних, проміжних та деформаційно неактивних областей. Сформовано деформаційний підхід до керування процесом змішування, який передбачає цілеспрямовану зміну умов формування локальних деформацій шляхом варіювання кінематичних параметрів руху робочого об'єму. Запропонована лабораторна установка забезпечує можливість варіювання кута нахилу робочої ємності, швидкості її обертання та конфігурації внутрішніх робочих органів, що створює передумови для встановлення кількісних залежностей між параметрами кінематичного режиму, структурою локальних деформацій та показниками ефективності змішування, а також для обґрунтування раціональних режимів роботи змішувачів.

Список використаних джерел

1. Danckwerts P. V. The definition and measurement of some characteristics of mixtures. *Applied Scientific Research*. 1952. Vol. 3, № 1. P. 279–296. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF03184936>.
2. Barnes H. A. The yield stress—a review or ‘παντα ρει’—everything flows? *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*. 1999. Vol. 81, № 1-2. P. 133-178. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0377-0257\(98\)00094-9](https://doi.org/10.1016/S0377-0257(98)00094-9).
3. Kupchuk I. Physical principles and classification of feed material mixing processes. *Техніка, енергетика, транспорт АПК*. 2025. № 4 (131). С. 46-59. DOI: <https://doi.org/10.37128/2520-6168-2025-4-6>.
4. Купчук І. М. Дескрипторний підхід до опису процесів змішування кормових матеріалів. *Вібрації в техніці та технологіях*. 2026. № 1 (120). С. 17-26. (Препринт).
5. Купчук І. М. Роль локальних деформацій у виникненні застійних зон при змішуванні кормів. Технічне забезпечення інноваційних технологій в агропромисловому комплексі: матеріали VI Міжнар. наук.-практ. конференції молодих учених (Запоріжжя, 02-27 лютого 2026 р.). Запоріжжя: ТДАТУ, 2026. С. 28-30.