

<https://doi.org/10.31891/2307-5732-2026-367-11>

УДК 631.363.4:66.061.34

КУПЧУК ІГОР

Вінницький національний аграрний університет

<https://orcid.org/0000-0002-2973-6914>e-mail: kupchuk.igor@i.ua

АНАЛІЗ МЕТОДІВ ОЦІНЮВАННЯ ЯКОСТІ ЗМІШУВАННЯ КОРМОВИХ МАТЕРІАЛІВ

У статті досліджено особливості оцінювання якості змішування кормових матеріалів як складного багатофакторного процесу, що визначає ефективність технологій кормоприготування та стабільність властивостей багатокомпонентних сумішей. Показано, що традиційні підходи до оцінювання однорідності, засновані переважно на статистичних показниках, не враховують у повній мірі фізичну природу матеріального середовища та механізми перебігу процесу змішування, що ускладнює інтерпретацію експериментальних результатів.

Метою роботи є узагальнення та систематизація методів оцінювання якості змішування кормових матеріалів з позицій їх інформативних можливостей і обмежень при використанні в експериментальних дослідженнях. У роботі застосовано системний підхід, відповідно до якого процес оцінювання розглянуто як послідовність взаємопов'язаних етапів – відбору проб, визначення їх складу, кількісного представлення результатів і статистичного узагальнення.

Запропоновано методологічну інтерпретацію оцінювання як процесу перетворення просторово-розподіленої структури суміші у систему узагальнюючих показників, що дозволяє встановити взаємозв'язок між способом отримання первинної інформації та характером кінцевих результатів. Обґрунтовано, що саме на етапах формування вибірки та визначення складу проб виникають основні джерела похибок, які впливають на достовірність оцінювання.

Систематизовано методи визначення складу проб за принципом отримання інформації та виділено механічні, трасерні, хімічні та візуально-оптичні підходи. Показано, що їх застосування забезпечує отримання різних типів експериментальних даних і, відповідно, дозволяє досліджувати різні аспекти процесу змішування – від кінцевої однорідності до динаміки та локальної структури суміші.

Отримані результати можуть бути використані як методологічна основа для формування програм експериментальних досліджень процесу змішування кормових матеріалів та обґрунтування вибору методів оцінювання в залежності від властивостей матеріалу і умов проведення експерименту.

Ключові слова: однорідність суміші, коефіцієнт варіації, відбір проб, визначення складу проб, методи оцінювання, сегрегація компонентів

IHOR KUPCHUK

Vinnytsia National Agrarian University

ANALYSIS OF METHODS FOR EVALUATING THE QUALITY OF MIXING OF FEED MATERIALS

The article examines the features of evaluating the quality of mixing of feed materials as a complex multifactor process that determines the efficiency of feed preparation technologies and the stability of properties of multicomponent mixtures. It is shown that traditional approaches to evaluating homogeneity, primarily based on statistical indicators, do not fully account for the physical nature of the material medium and the mechanisms governing the mixing process, which complicates the interpretation of experimental results.

The aim of the study is to generalize and systematize methods for evaluating the quality of mixing of feed materials from the standpoint of their informative capabilities and limitations when used in experimental research. A systems approach is applied, according to which the evaluation process is considered as a sequence of interrelated stages, including sampling, determination of sample composition, quantitative representation of results, and statistical generalization.

A methodological interpretation of evaluation is proposed as a process of transforming the spatially distributed structure of a mixture into a system of generalized indicators, which makes it possible to establish the relationship between the method of obtaining primary information and the nature of the final results. It is substantiated that the main sources of error arise at the stages of sample formation and determination of their composition, which significantly affects the reliability of evaluation.

Methods for determining sample composition are systematized according to the principle of information acquisition, and mechanical, tracer, chemical, and visual-optical approaches are distinguished. It is shown that their application leads to the formation of different types of experimental data and, accordingly, enables the study of various aspects of the mixing process, including final homogeneity, process dynamics, and local structure of the mixture.

The obtained results can be used as a methodological basis for developing experimental research programs on feed mixing processes and for substantiating the selection of evaluation methods depending on material properties and experimental conditions.

Keywords: mixture homogeneity, coefficient of variation, sampling, determination of sample composition, evaluation methods, component segregation.

Стаття надійшла до редакції / Received 20.04.2026

Прийнята до друку / Accepted 17.07.2026

Опубліковано / Published 31.07.2026



This is an Open Access article distributed under the terms of the [Creative Commons CC-BY 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

© Купчук Ігор

Вступ

Процеси змішування кормових матеріалів є невід'ємною складовою технологій приготування багатокомпонентних раціонів і безпосередньо визначають їх поживну цінність та ступінь однорідності. У сучасних умовах підвищення вимог до ефективності тваринництва забезпечення рівномірного розподілу компонентів у кормових сумішах набуває особливої актуальності, оскільки неоднорідність суміші призводить до селективного споживання окремих компонентів і, як наслідок, до порушення збалансованості раціону та зниження продуктивності тварин [1].

У більшості досліджень оцінювання якості змішування здійснюється із застосуванням статистичних показників однорідності, зокрема коефіцієнта варіації, дисперсійних характеристик або трасерних методів [2, 3]. Такі підходи широко використовуються для аналізу рівномірності розподілу компонентів у повнозмішаних раціонах (TMR) та дозволяють кількісно оцінити ступінь гомогенізації суміші. Разом з тим зазначені методи переважно розглядаються як універсальні інструменти оцінювання без урахування фізико-механічних і реологічних властивостей матеріалів, що змішуються, а також без прив'язки до домінуючих механізмів процесу змішування.

Як показують сучасні дослідження процесів змішування багатокомпонентних середовищ, характер перебігу процесу визначається поєднанням механізмів конвективного перенесення, зсувної деформації та сегрегаційних явищ, інтенсивність яких суттєво залежить від структурно-механічних властивостей матеріалу [4, 5]. У випадку кормових сумішей, які можуть поєднувати сипкі, когезійні, волокнисті та в'язкопластичні компоненти, використання єдиного узагальненого критерію оцінювання якості змішування не завжди забезпечує адекватне відображення реальної просторової структури суміші.

Існуючі підходи до оцінювання якості змішування не узгоджені з фізичною природою матеріального середовища та механізмами перебігу процесу, що ускладнює інтерпретацію результатів експериментальних досліджень і знижує достовірність їх порівняння для різних режимів змішування. За таких умов вибір методу оцінювання набуває визначального значення при формуванні методики дослідження процесу змішування, оскільки саме він задає критерій ефективності та визначає характер отримуваних експериментальних результатів.

Мета та завдання досліджень

Метою дослідження є узагальнення існуючих методів оцінювання якості змішування кормових матеріалів та визначення їх придатності для використання в експериментальних дослідженнях.

Для досягнення поставленої мети необхідно розв'язати такі **завдання**:

- проаналізувати існуючі методи оцінювання якості змішування, що застосовуються для дисперсних багатокомпонентних середовищ;
- встановити особливості їх застосування та обмеження при використанні в експериментальних дослідженнях;
- узагальнити підходи до застосування методів оцінювання якості змішування залежно від властивостей матеріалу та умов експериментального дослідження.

Результати досліджень

Оцінювання якості змішування багатокомпонентних середовищ, як правило, базується на отриманні експериментальних даних про розподіл компонентів у суміші та їх подальшій статистичній обробці. У цьому процесі визначальне значення має не лише вибір показника однорідності, але й спосіб формування вибірки, що включає відбір проб і визначення їх складу [6-8]. Саме на цих етапах формуються основні похибки оцінювання, які істотно впливають на інтерпретацію результатів.

Процес оцінювання доцільно розглядати як послідовний багатоступеневий процес, у якому результат формується через ряд взаємопов'язаних етапів, що мають різну фізичну та методологічну природу (рис. 1). Узагальнено така процедура включає:

- відбір проб із робочого об'єму суміші;
- визначення складу проб;
- кількісне визначення вмісту компонентів;
- розрахунок узагальнюючих показників однорідності.

Зазначена послідовність етапів відображає логіку формування експериментальних даних при дослідженні процесів змішування і може розглядатися як інваріантна щодо конкретного методу оцінювання, оскільки охоплює повний цикл переходу від фізичного стану суміші до його кількісного представлення. У цьому контексті оцінювання якості змішування доцільно інтерпретувати як послідовне перетворення просторово-розподіленої структури матеріалу у систему узагальнюючих показників, що характеризують ступінь його однорідності.

Першим етапом є відбір проб, який слід розглядати як самостійну і критично важливу процедуру, що визначає достовірність усіх подальших результатів. Основною вимогою до відбору є забезпечення репрезентативності, тобто відповідності вибірки реальному розподілу компонентів у всьому об'ємі суміші. З цієї метою робочий об'єм системи доцільно розглядати як дискретизовану область V , у якій точки відбору задаються у вигляді множини координат $\mathbf{x}_i = (r, z, \theta)$. Такий підхід дозволяє формалізувати просторову структуру відбору та забезпечити відтворюваність експерименту.

Просторове покриття об'єму реалізується шляхом відбору проб із характерних зон, до яких належать центральна частина об'єму, периферійні області, верхні та нижні шари, а також зони потенційної сегрегації. При цьому доцільним є застосування регулярних або стратифікованих схем відбору, за яких об'єм поділяється на елементарні області з фіксованими координатами. Це дозволяє забезпечити контроль просторової дискретизації та мінімізувати систематичні похибки.

За часовою організацією відбір проб може бути кінцевим (після завершення процесу), дискретним у фіксовані моменти часу t_i або періодичним через інтервали Δt , що забезпечує можливість дослідження кінетики

процесу змішування. Таким чином, відбір проб формує просторово-часову вибірку, яка відображає стан системи у відповідному фазовому просторі.

Кількість проб визначається вимогами до точності оцінювання і може бути оцінена за співвідношенням

$$n \geq \left(\frac{t \cdot s}{\Delta} \right)^2, \quad (1)$$

де n – кількість проб, t – коефіцієнт Стюдента, s – стандартне відхилення, Δ – допустима похибка. На практиці в інженерних дослідженнях змішування кількість проб, як правило, обмежується діапазоном 5-20, що є компромісом між трудомісткістю експерименту та точністю результатів.

Маса проби повинна забезпечувати представлення всіх компонентів суміші. Відповідно до теорії відбору проб фундаментальна похибка описується співвідношенням:

$$\sigma_{FSE}^2 \propto \frac{d^3}{m}, \quad (2)$$

де d – характерний розмір частинок, m – маса проби. Це означає, що зі збільшенням розміру частинок або ступеня неоднорідності матеріалу необхідно пропорційно збільшувати масу проби для забезпечення статистичної достовірності результатів.

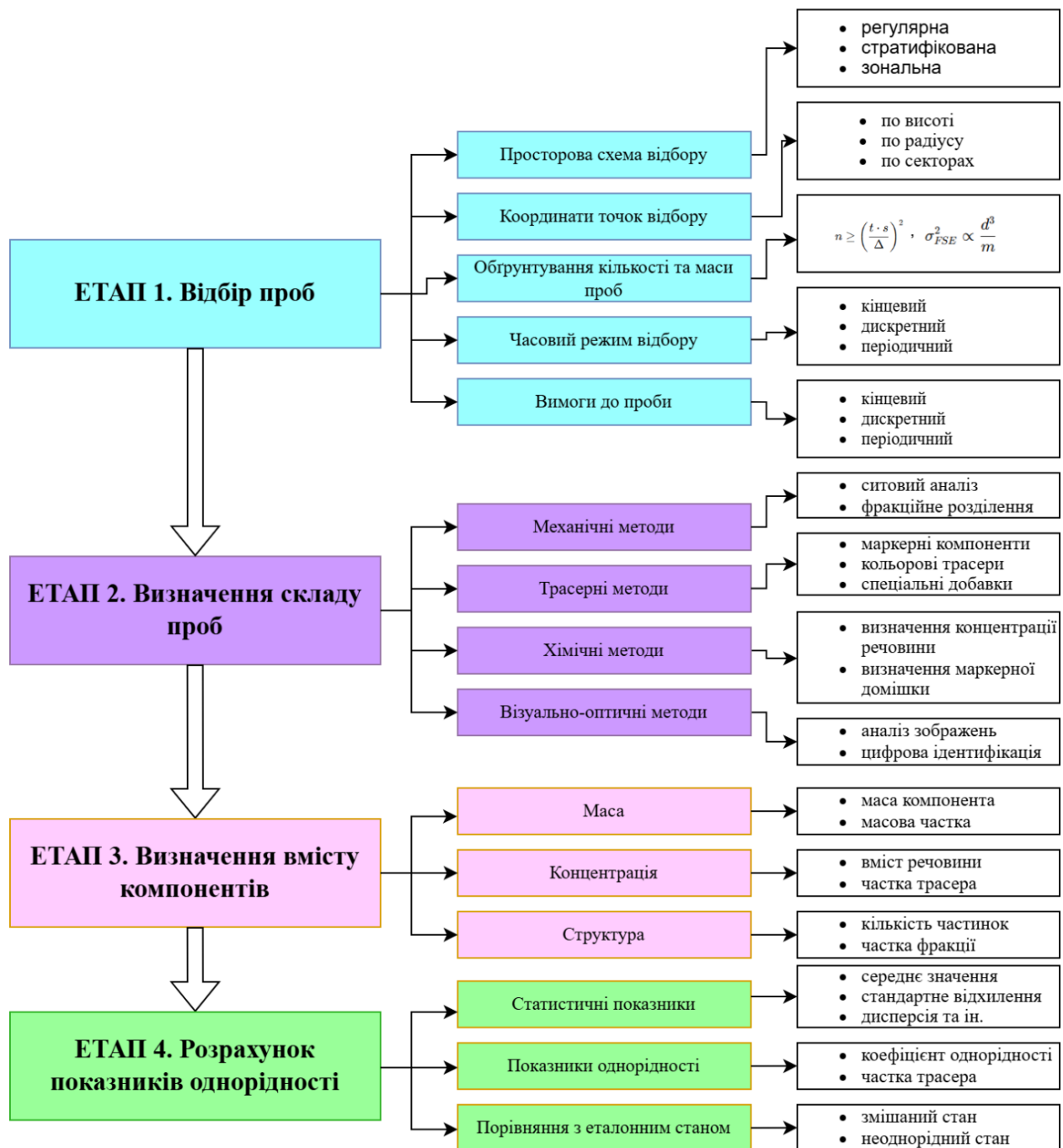


Рис. 1. Методологічна схема формування даних для оцінювання якості змішування багатокomпонентних середовищ

Другим етапом є визначення складу проб, яке забезпечує отримання інформації про розподіл компонентів у системі. Залежно від фізичних властивостей матеріалу та принципу отримання інформації доцільно виділяти такі групи методів: механічні, трасерні, хімічні та візуально-оптичні. Механічні методи базуються на фізичному розділенні компонентів (зокрема, за розміром частинок), трасерні – на введенні індикаторного компонента та аналізі його розподілу, хімічні – на визначенні складу через властивості речовини, а візуально-оптичні – на обробці зображень і цифровій ідентифікації компонентів.

Після ідентифікації компонентів здійснюється їх кількісне визначення, яке може реалізовуватися за трьома основними підходами: масовим, концентраційним і структурним. Масовий підхід базується на визначенні маси компонентів та їх масових часток:

$$w_i = \frac{m_i}{m}, \quad (3)$$

де m_i – маса компонента, m – маса проби.

Концентраційний підхід передбачає визначення вмісту речовини або частки трасера:

$$x_i = \frac{m_{tr,i}}{m}, \quad (4)$$

де $m_{tr,i}$ – маса трасера у пробі.

Структурний підхід орієнтований на аналіз дискретної будови матеріалу і може бути представлений у вигляді відносної кількості частинок:

$$x_i = \frac{N_i}{N}, \quad (5)$$

де N_i – кількість частинок компонента, N – загальна кількість частинок. У цьому випадку чисельне моделювання (зокрема, DEM) фактично реалізує віртуальний експеримент, що відтворює процедуру відбору проб і визначення їх складу.

Завершальним етапом є розрахунок узагальнюючих показників однорідності, які мають статистичну природу і відображають ступінь вирівнювання просторового розподілу компонентів. Найбільш поширеним є коефіцієнт варіації:

$$CV = \frac{s}{\bar{x}} \cdot 100\%, \quad (6)$$

де стандартне відхилення визначається як

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}. \quad (7)$$

Крім того, застосовуються індекси змішування, зокрема

$$M = 1 - \frac{s}{s_0}, \quad (8)$$

де s_0 – стандартне відхилення для повністю неоднорідного стану.

Таким чином, оцінювання якості змішування є багаторівневою процедурою, у якій кожний етап (від просторової дискретизації об'єму до статистичної обробки результатів) формує відповідний рівень опису системи. Похибки попередніх етапів акумулюються на наступних, визначаючи інтегральну невизначеність оцінювання. У цьому сенсі узагальнюючі показники однорідності можуть бути розглянуті як функціонали від просторово-розподіленого поля концентрацій $x(x, t)$, а їх значення залежить не лише від фізичного стану суміші, але й від методики експерименту, що необхідно враховувати при формуванні науково обґрунтованих підходів до дослідження процесів змішування.

З огляду на проведений аналіз методів визначення складу проб, слід зазначити, що їх вибір у загальному випадку не може здійснюватися на основі формального переліку або поширеності застосування, а повинен визначатися відповідністю умовам конкретного експериментального дослідження. Особливо це стосується лабораторних досліджень процесу змішування, у яких, поряд із оцінюванням кінцевої однорідності суміші, необхідно забезпечити можливість аналізу динаміки та кінетики перерозподілу компонентів.

У зв'язку з цим доцільно здійснювати порівняльну оцінку методів не лише за їх загальними характеристиками, але й з урахуванням інформативних можливостей, обмежень та придатності до реалізації в умовах лабораторного експерименту. Такий підхід дозволяє перейти від описового аналізу до обґрунтованого вибору методів, орієнтованого на забезпечення достовірності експериментальних даних і адекватності їх подальшої інтерпретації.

З урахуванням того, що подальші дослідження планується проводити на лабораторному зразку змішувача з використанням модельних сипких сумішей, порівняльну характеристику методів доцільно представити з позицій їх застосовності для дослідження процесу змішування, зокрема оцінювання однорідності, динаміки та кінетики формування структури суміші. Результати такого порівняння наведено в таблиці 1.

Таблиця 1

**Порівняльна характеристика методів визначення складу проб за інформативними
можливостями та обмеженнями при дослідженні процесу змішування**

Методи	Принцип отримання інформації	Інформативні можливості	Обмеження/ Характеристика	Типові умови застосування
Механічні	Розділення компонентів за розміром частинок з подальшим визначенням їх масових часток	Оцінювання кінцевої однорідності, дослідження динаміки та кінетики змішування при відборі проб у часі, аналіз сегрегації	Характерні для сумішей, компоненти яких відрізняються за розмірами частинок, чутливі до явищ сегрегації	Застосовується для модельних сипких сумішей, у тому числі при лабораторних дослідженнях динаміки змішування
Трасерні	Визначення розподілу маркерного компонента у суміші	Дослідження кінетики перерозподілу окремого компонента, оцінювання локальної неоднорідності, порівняння режимів змішування	Потребують підбору трасера з фізико-механічними властивостями, близькими до основного матеріалу, можливий вплив маркера на достовірність результатів	Застосовується для аналізу динаміки процесу змішування та уточнення розподілу окремих компонентів.
Хімічні	Визначення концентрації компонента або індикаторної речовини у пробі	Визначення складу складних багатокомпонентних систем, оцінювання однорідності за показниками концентрації	Висока вартість, трудомісткість, потреба у лабораторному обладнанні та реактивах	Застосовується для складних багатокомпонентних систем за потреби у високій точності визначення складу або концентрації окремих компонентів
Візуально-оптичні	Аналіз зображень, відеофіксація, цифрова ідентифікація компонентів	Візуалізація структури потоку, якісний аналіз зон неоднорідності, спостереження за динамікою процесу	Обмежені умовами візуалізації (освітлення, контрастність компонентів), ускладнена кількісна інтерпретація результатів	Використовується для візуалізації процесу змішування та інтерпретації структури потоку

Таким чином, проведений аналіз показує, що методи визначення складу проб відрізняються не лише за принципом отримання інформації, але й за характером експериментальних даних. Це зумовлює необхідність їх узгодженого розгляду в контексті єдиної процедури оцінювання якості змішування, яка включає етапи відбору проб, визначення їх складу, кількісного визначення вмісту компонентів та статистичного узагальнення. У цьому контексті кожний із розглянутих методів формує відповідний рівень опису системи та визначає специфіку інтерпретації отриманих результатів.

Висновки та перспективи подальших досліджень

У результаті проведеного дослідження узагальнено існуючі підходи до оцінювання якості змішування кормових матеріалів та встановлено, що їх основою є отримання експериментальних даних про розподіл компонентів у суміші з подальшою статистичною обробкою. Показано, що оцінювання якості змішування доцільно розглядати як багатоступеневу процедуру, яка включає відбір проб, визначення їх складу, кількісне представлення результатів і розрахунок узагальнюючих показників однорідності.

Систематизовано методи визначення складу проб за принципом отримання інформації та встановлено їх інформативні можливості і обмеження. Показано, що механічні, трасерні, хімічні та візуально-оптичні методи формують різні типи експериментальних даних і забезпечують дослідження різних аспектів процесу змішування, зокрема кінцевої однорідності, локальної структури та динаміки перерозподілу компонентів.

Встановлено, що результати оцінювання якості змішування визначаються не лише фізичним станом суміші, але й особливостями методики експерименту, зокрема схемою відбору проб, способом визначення їх складу та формою статистичного узагальнення. Це зумовлює необхідність узгодженого розгляду методів у межах єдиної методологічної схеми дослідження процесу змішування.

Отримані результати формують теоретико-методологічну основу для подальших експериментальних досліджень процесу змішування кормових матеріалів, зокрема при розробленні лабораторних установок та виборі адекватних методів оцінювання динаміки і кінетики формування однорідності суміші.

Література

1. Schingoethe D. J. A 100-Year Review: Total mixed ration feeding of dairy cows. *Journal of Dairy Science*. 2017. Vol. 100, No. 12. P. 10143–10150. <https://doi.org/10.3168/jds.2017-12967>
2. Buckmaster D. R., Heinrichs A. J., Lames P. A. Review of methods to determine feed mixing uniformity. *Applied Engineering in Agriculture*. 2003. Vol. 19, No. 6. P. 713–719. <https://doi.org/10.13031/2013.15699>
3. Heinrichs A. J., Kononoff P. J. Evaluating particle size of forages and TMRs using the Penn State Particle Separator. *Pennsylvania State University*. 2002.
4. Kupchuk I. Physical principles and classification of feed material mixing processes. *Техніка, енергетика, транспорт АПК*. 2025. № 4 (131). С. 55-68. DOI: <https://doi.org/10.37128/2520-6168-2025-4-6>
5. Купчук І.М. Дескрипторний підхід до опису процесів змішування кормових матеріалів. *Вібрації в техніці та технологіях*. 2026. №1(120). С. 17-26. <https://doi.org/10.37128/2306-8744-2026-1-26>
6. Fan L. T., Chen Y. M., Lai F. S. Recent developments in solids mixing. *Powder Technology*. 1990. Vol. 61, Iss. 3, P. 255–287. [https://doi.org/10.1016/0032-5910\(90\)80092-D](https://doi.org/10.1016/0032-5910(90)80092-D)
7. Gy P. Sampling of particulate materials: theory and practice. Amsterdam: Elsevier, 2012. 450 p.
8. Ottino J. M. The Kinematics of Mixing. Cambridge University Press, 1989. 396 p.
9. Allen T. Particle Size Measurement. New York: Chapman & Hall, 1997. 149 p.
10. Bridgwater J. Mixing of powders and granular materials. *Particuology*. 2012. Vol. 10, Iss. 4, P. 397–427. <https://doi.org/10.1016/j.partic.2012.06.002>
11. Yang R.Y., Zou R.P., Yu A.B. Computer simulation of the packing of fine particles. *Physical Review E*. 2000. Vol. 62(3 B), P. 3900–3908. <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.62.3900>

References

1. Schingoethe, D. J. (2017). A 100-year review: Total mixed ration feeding of dairy cows. *Journal of Dairy Science*, 100(12), 10143–10150. <https://doi.org/10.3168/jds.2017-12967>
2. Buckmaster, D. R., Heinrichs, A. J., & Lames, P. A. (2003). Review of methods to determine feed mixing uniformity. *Applied Engineering in Agriculture*, 19(6), 713–719. <https://doi.org/10.13031/2013.15699>
3. Heinrichs, A. J., & Kononoff, P. J. (2002). *Evaluating particle size of forages and TMRs using the Penn State Particle Separator*. Pennsylvania State University.
4. Kupchuk, I. (2025). Physical principles and classification of feed material mixing processes. *Tekhnika, enerhetyka, transport APK*, 4(131), 55–68. <https://doi.org/10.37128/2520-6168-2025-4-6>
5. Kupchuk, I. M. (2026). Deskriptornyi pidkhid do opysu protsesiv zmishuvannia kormovykh materialiv [Descriptor approach to the description of feed material mixing processes]. *Vibratsii v tekhnitsi ta tekhnolohiiakh*, 1(120), 17–26. <https://doi.org/10.37128/2306-8744-2026-1-26> [in Ukrainian]
6. Fan, L. T., Chen, Y. M., & Lai, F. S. (1990). Recent developments in solids mixing. *Powder Technology*, 61(3), 255–287. [https://doi.org/10.1016/0032-5910\(90\)80092-D](https://doi.org/10.1016/0032-5910(90)80092-D)
7. Gy, P. (2012). *Sampling of particulate materials: Theory and practice*. Elsevier.
8. Ottino, J. M. (1989). *The kinematics of mixing*. Cambridge University Press.
9. Allen, T. (1997). *Particle size measurement*. Chapman & Hall.
10. Bridgwater, J. (2012). Mixing of powders and granular materials. *Particuology*, 10(4), 397–427. <https://doi.org/10.1016/j.partic.2012.06.002>
11. Yang, R. Y., Zou, R. P., & Yu, A. B. (2000). Computer simulation of the packing of fine particles. *Physical Review E*, 62(3B), 3900–3908. <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.62.3900>