e-ISSN 2708-9754; ISSN 2307-1699
СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКІ МАШИНИ, 2026, Вип. 52
AGRICULTURAL MACHINES, 2026, Vol. 52

CONTROL OF FEED RAW MATERIAL GRINDING DEGREE DURING LIQUID FEED PREPARATION

R. Malegin *

Dnipro State Agrarian and Economic University, Dnipro, Ukraine

AGRICULTURAL MACHINES
СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКІ МАШИНИ

Key words:
feed raw material,
grinding,
particle size distribution,
particle size,
liquid feed,
dispersion,
homogenization,
energy consumption

Article history:
Received 13.09.2026
Reviewed 25.09.2026
Approved 30.10.2026

Corresponding author:*
malegin.r.d@dsau.dp.ua

ABSTRACT

Feed raw material grinding is an important feed preparation operation that determines particle size distribution, physical properties and, to a considerable extent, the technological suitability of the final product. In liquid feeds, the importance of grinding is additionally related to the need to maintain dispersion uniformity, storage stability and the ability to transport the feed mixture through pipelines. The aim of this study is to systematize modern approaches to controlling the degree of feed raw material grinding during liquid feed preparation and to substantiate a set of indicators for evaluating the efficiency of grinding and dispersing equipment. Scientific publications concerning the effects of particle size on physical and nutritional properties of feed, methods for determining particle size distribution, dry and wet sieving procedures, energy consumption during grinding and technological properties of liquid feeds were analyzed. It was established that evaluating the process only by mean particle size does not provide a complete characterization of feed structure because samples with similar mean values may have substantially different particle size distributions. For liquid feeds, comprehensive control should include the mass fraction of individual particle classes, mean particle size, dispersion uniformity, tendency to stratification, equipment productivity and specific energy consumption. Particular attention was paid to particles smaller than 0.5 mm, which were used as one of the process indicators in a recent study of a liquid-feed homogenizer-disperser. It was established that this fraction can be used as a control indicator for a specific technological process, but should not be considered a universal target for all types of feed raw materials and diets. A technological control sequence is proposed, including representative sampling, determination of particle size distribution, assessment of mixture stability and comparison of the obtained indicators with equipment operating parameters. It is shown that an appropriate grinding regime should provide the required feed structure without unjustified increases in energy consumption.

DOI: 10.36910/acm.vi52.2331

To cite this article:
Malegin, R. (2026). Control of feed raw material grinding degree during liquid feed preparation. *Agricultural Machines*, *52*, 73-84. https://doi.org/10.36910/acm.vi52.2331

e-ISSN 2708-9754; ISSN 2307-1699
СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКІ МАШИНИ, 2026, Вип. 52
AGRICULTURAL MACHINES, 2026, Vol. 52

УДК 631.363.2

КОНТРОЛЬ СТУПЕНЯ ПОДРІБНЕННЯ КОРМОВОЇ СИРОВИНИ ПІД ЧАС ПРИГОТУВАННЯ РІДКОГО КОРМУ

Р.Д. Малєгін

Дніпровський державний аграрно-економічний університет , Дніпро, Україна

AGRICULTURAL MACHINES
СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКІ МАШИНИ

Ключові слова:
кормова сировина,
подрібнення,
гранулометричний склад,
розмір частинок,
рідкий корм,
диспергування,
гомогенізація,
енерговитрати

Історія публікації:
Отримано 13.09.2026
Прорецензовано 25.09.2026
Затверджено до друку 30.10.2026

Автор для листування:*
malegin.r.d@dsau.dp.ua

АНОТАЦІЯ

Подрібнення кормової сировини є важливою операцією підготовки кормів, яка визначає гранулометричний склад, фізичні властивості та значною мірою технологічну придатність кінцевого продукту. Для рідких кормів значення цієї операції додатково зумовлене необхідністю забезпечення однорідності дисперсної системи, стабільності під час зберігання та можливості транспортування кормової суміші трубопроводами. Метою роботи є систематизація сучасних підходів до контролю ступеня подрібнення кормової сировини під час приготування рідкого корму та обґрунтування комплексу показників для оцінювання ефективності подрібнювально-диспергувального обладнання. Проаналізовано наукові публікації щодо впливу розміру частинок на фізичні й поживні властивості корму, методів визначення гранулометричного складу, особливостей сухого та мокрого просіювання, енергетичних витрат під час подрібнення та технологічних властивостей рідких кормів. Встановлено, що оцінювання процесу лише за середнім розміром частинок не забезпечує повної характеристики структури корму, оскільки зразки з близькими середніми значеннями можуть мати істотно різний розподіл частинок за фракціями. Для рідких кормів доцільно застосовувати комплексний контроль, який охоплює масову частку окремих фракцій, середній розмір частинок, однорідність дисперсної системи, схильність до розшаровування, продуктивність обладнання та питомі енерговитрати.

Окрему увагу приділено фракції частинок розміром до 0,5 мм, яка використовувалася як один із критеріїв оцінювання процесу диспергування у сучасному дослідженні гомогенізатора-диспергатора рідкого корму.

Обґрунтовано, що цю фракцію доцільно використовувати як контрольний показник конкретного технологічного процесу, але не як універсальний норматив для всіх видів кормової сировини та раціонів. Запропоновано послідовність технологічного контролю, яка передбачає репрезентативний відбір проб, визначення гранулометричного складу, оцінювання стабільності суміші та зіставлення отриманих показників із режимами роботи обладнання. Показано, що раціональний режим подрібнення повинен забезпечувати необхідну структуру корму без необґрунтованого збільшення енерговитрат.

DOI: 10.36910/acm.vi52.2331

Цитувати цю статтю:
Малєгін, Р. Д. (2026). Контроль ступеня подрібнення кормової сировини під час приготування рідкого корму. *Сільськогосподарські машини*, *52*, 73-84. https://doi.org/10.36910/acm.vi52.2331

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

Подрібнення є однією з основних операцій підготовки зернової та іншої кормової сировини. У результаті механічного впливу вихідний матеріал поділяється на частинки меншого розміру, що змінює його питому поверхню, фізичні властивості та умови подальшої взаємодії з іншими компонентами корму. Ступінь подрібнення впливає не тільки на технологічні характеристики кормової суміші, а й на доступність поживних речовин під час травлення. Тому контроль розміру частинок є важливою складовою технології виробництва кормів для свиней.

Особливого значення ця проблема набуває під час приготування рідкого корму. На відміну від сухих кормових сумішей, рідкий корм являє собою дисперсну систему, у якій тверді частинки розподілені в рідкій фазі. Тому технологічна якість такого корму визначається не лише крупністю подрібнених компонентів, а й рівномірністю їх розподілу, стабільністю системи, схильністю частинок до осідання, а також властивостями суміші під час транспортування.

Зменшення розміру частинок загалом збільшує площу їх поверхні та може покращувати використання поживних речовин. У дослідженні *Wondra et al. (1995a)* для кукурудзи в раціонах свиней порівнювали середній розмір частинок 1000, 800, 600 і 400 мкм. Було встановлено, що зменшення крупності подрібнення впливало на енергетичні витрати процесу, продуктивність подрібнювання, перетравність поживних речовин та ефективність використання корму. При цьому автори показали, що зменшення розміру частинок супроводжується зростанням енергетичних витрат на подрібнення.

Таким чином, збільшення інтенсивності подрібнення не може розглядатися як безумовно позитивний фактор. Необхідно встановлювати такий режим роботи обладнання, за якого досягається необхідний гранулометричний склад корму при прийнятних енергетичних витратах.

Окремою проблемою є характеристика самого гранулометричного складу. Середній розмір частинок не завжди достатньо точно характеризує структуру корму. Два зразки можуть мати близьке середнє значення, але істотно відрізнятися часткою дрібних і крупних частинок. Саме тому сучасні дослідження розглядають розподіл частинок за розміром як систему показників, а не як одну середню величину *(Lyu et al., 2020).*

Для кормів свиней питання структури частинок має також фізіологічне значення. Огляд *Vukmirović et al. (2017)* показує, що зменшення розміру частинок може сприяти підвищенню ефективності використання корму, але надмірне подрібнення може бути небажаним для стану шлунково-кишкового тракту. Тому технологічне завдання полягає не в отриманні максимально дрібної фракції, а у формуванні контрольованої структури корму. Для рідких кормів до цього додається необхідність забезпечення стабільності суміші. Великі частинки можуть швидше осідати, тоді як надмірна кількість дрібної фракції може змінювати фізичні властивості дисперсної системи. Отже, під час оцінювання процесу подрібнення необхідно враховувати не тільки крупність матеріалу, а й поведінку отриманих частинок у рідкій фазі.

АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

Питання визначення та контролю розміру частинок кормової сировини досліджується протягом тривалого часу. Одним із найбільш поширених методів є ситовий аналіз. Його перевагою є відносна простота, доступність обладнання та можливість визначення масових часток окремих фракцій.

Wolf et al. (2010) розглядали методику визначення гранулометричного складу кормів для свиней та показали, що результати аналізу залежать від виду зернової сировини, способу її подрібнення та подальшої технологічної обробки. Важливим результатом дослідження стало встановлення впливу способу просіювання на отриманий розподіл частинок. Автори використовували сухе та мокре просіювання і наголошували на необхідності стандартизації методики для можливості коректного порівняння результатів.

Проблему вибору показника, який узагальнює результати ситового аналізу, досліджували *Fritz et al. (2012)*. Автори порівняли декілька способів опису середнього розміру частинок і показали, що вибір математичного показника може впливати на інтерпретацію результатів. Для практичних досліджень автори запропонували використовувати дискретне середнє значення як відносно простий спосіб узагальнення результатів ситового аналізу.

Lyu et al. (2020) здійснили комплексний огляд сучасних методів зменшення розміру частинок у технології кормів. Розглянуто молоткові та вальцьові подрібнювачі, багатоступеневе подрібнення,

ситовий аналіз, лазерну дифракцію та аналіз зображень. Автори звертають увагу на те, що різні способи визначення розміру частинок характеризують різні властивості матеріалу, а тому пряме порівняння результатів, отриманих різними методами, може бути некоректним.

Важливим висновком *Lyu et al. (2020)* є те, що традиційного геометричного середнього діаметра частинок не завжди достатньо для пояснення відмінностей у продуктивності тварин. Тому перспективним напрямом є комплексний опис гранулометричного складу, який враховує розподіл частинок, а за можливості — їх форму, об'єм та площу поверхні.

Bertsch et al. (2022) дослідили гранулометричний склад 51 комерційного корму для свиней, використовуючи сухий та мокрий ситовий аналіз. Автори встановили, що результати суттєво залежать від способу проведення аналізу. Під час мокрого просіювання значна частина матеріалу могла проходити крізь найдрібніше сито або переходити у розчинну фазу. На основі отриманих результатів автори рекомендували враховувати втрати матеріалу під час розрахунку середнього розміру частинок і розглядати мокре просіювання як доцільний метод аналізу у відповідних випадках.

Значення рівномірності розміру частинок також підтверджено дослідженнями *Wondra et al. (1995b)*. За близького середнього розміру частинок різний ступінь однорідності гранулометричного складу впливав на перетравність поживних речовин. Це свідчить про необхідність контролю не лише середньої крупності, а й ширини розподілу частинок.

Вплив способу подрібнення на енергетичну ефективність досліджували Thomas et al. (2018). Автори порівнювали різні способи грубого подрібнення пшениці, кукурудзи та сої. Встановлено, що енергетичні витрати залежать як від виду сировини, так і від типу подрібнювального обладнання. Для досліджених умов вальцьовий подрібнювач характеризувався нижчими питомими енерговитратами для грубого подрібнення, ніж молотковий.

Важливим фактором є також вологість сировини. *Lyu et al. (2022)* досліджували подрібнення кукурудзи та соєвого шроту за різної вологості. Зі збільшенням вологості змінювалися гранулометричний склад матеріалу та енергетичні витрати. Автори встановили, що підвищення вологості супроводжувалося збільшенням геометричного середнього діаметра та енергоспоживання під час молоткового подрібнення. Для рідкого корму важливим є зв'язок між розміром частинок і фізичними властивостями суміші. *Beal et al. (2001)* досліджували взаємозв'язок між крупністю зернових компонентів, розміром частинок і в'язкістю рідких раціонів для свиней. Це має безпосереднє значення для механізованих систем транспортування, оскільки рідкий корм повинен переміщуватися трубопроводами та насосами без надмірного збільшення опору руху або осідання твердих частинок.

Таким чином, аналіз наукових публікацій показує, що ступінь подрібнення необхідно розглядати у взаємозв'язку з гранулометричною однорідністю, властивостями сировини, способом подрібнення та подальшим використанням корму.

МЕТА ДОСЛІДЖЕННЯ

Метою роботи є систематизація сучасних підходів до контролю ступеня подрібнення кормової сировини під час приготування рідкого корму та обґрунтування комплексу показників для оцінювання гранулометричного складу, стабільності рідкої кормової суміші й енергетичної ефективності подрібнювально-диспергувального обладнання.

Для досягнення поставленої мети необхідно:

– проаналізувати сучасні методи визначення гранулометричного складу кормової сировини;

– визначити основні показники, що характеризують ступінь подрібнення;

– встановити значення гранулометричного складу для технологічних властивостей рідкого корму;

– проаналізувати зв'язок між інтенсивністю подрібнення та енергетичними витратами;

– сформувати послідовність технологічного контролю роботи подрібнювально-диспергувального обладнання.

МАТЕРІАЛИ І МЕТОДИ

Роботу виконано як аналітичний огляд наукових досліджень, присвячених технології подрібнення кормової сировини, визначенню гранулометричного складу, фізичним властивостям рідких кормів та роботі диспергувального обладнання.

Для аналізу використано результати рецензованих наукових публікацій, у яких досліджувалися:

– вплив розміру частинок кормової сировини на використання поживних речовин;

– вплив способу подрібнення на гранулометричний склад;

– методи сухого та мокрого ситового аналізу;
– показники середнього розміру та розподілу частинок;
– вплив вологості сировини на процес подрібнення;
– енергетичні витрати під час подрібнення;
– фізичні властивості рідких кормових сумішей;
– процеси гомогенізації та диспергування рідкого корму.

Для кількісного опису гранулометричного складу використовується масова частка окремої фракції:

$$w_i = \frac{m_i}{m_0} \cdot 100, \quad (1)$$

де w_i– масова частка i-ї фракції, %;
m_i– маса матеріалу i-ї фракції, г;
m_0– загальна маса досліджуваної проби, г.

Сума масових часток усіх визначених фракцій повинна відповідати загальній масі проби з урахуванням допустимої похибки визначення:

$$\sum_{i=1}^{n} w_i \approx 100\%. \quad (2)$$

Такий контроль є необхідним для перевірки правильності проведення ситового аналізу.

Для узагальнення результатів ситового аналізу може використовуватися середній діаметр частинок. У разі застосування представницького діаметра кожної фракції його можна визначати як середнє геометричне розмірів суміжних сит:

$$d_i = \sqrt{d_{i-1} d_i^*}, \quad (3)$$

де d_{i-1}та d_i^*– розміри отворів суміжних сит, мм.

На основі частки матеріалу окремих фракцій може бути визначене дискретне середнє значення розміру частинок:

$$d_{\text{mean}} = \frac{\sum_{i=1}^{n} d_i \, m_i}{\sum_{i=1}^{n} m_i}, \quad (4)$$

де d_{mean}– середній діаметр частинок, мм;
d_i– представницький діаметр i-ї фракції, мм;
m_i– маса матеріалу i-ї фракції, г.

Застосування такого показника має супроводжуватися наведенням набору сит, оскільки результат залежить від методики визначення та діапазону фракцій (Fritz et al., 2012; Lyu et al., 2020).

Для оцінювання енергетичної ефективності процесу визначають питомі енерговитрати. Якщо потужність привода та тривалість роботи відомі, загальна витрачена енергія може бути визначена як:

$$E = Pt, \quad (5)$$

де E– спожита енергія, Дж;
P– потужність привода, Вт;
t– тривалість роботи обладнання, с.

Питомі енерговитрати визначають:

$$e_s = \frac{E}{m}, \quad (6)$$

де e_s– питомі енерговитрати, Дж/кг;
E– загальна спожита енергія, Дж;
m– маса обробленої сировини, кг.

За використання потужності в кВт і часу в годинах енергію доцільно визначати в кВт·год:

$$E = Pt, \quad (7)$$

де P– потужність, кВт; t– тривалість роботи, год.

Для порівняння стабільності рідкого корму за різними режимами роботи обладнання може використовуватися індекс розшаровування. У межах запропонованого підходу його можна визначати за концентрацією контрольного компонента у верхній та нижній частинах суміші:

$$I_s = \frac{| C_в - C_н |}{C_{сер}} \cdot 100, \quad (8)$$

де I_s– індекс розшаровування, %;

$C_в$– концентрація контрольного компонента у верхній частині проби;

$C_н$– концентрація контрольного компонента у нижній частині проби;

$C_{сер}$– середня концентрація контрольного компонента у всій пробі.

Формула (8) у цій роботі розглядається як запропонований аналітичний показник для порівняння стабільності сумішей, а не як універсальний стандартизований норматив. Конкретна методика визначення $C_в$, $C_н$та $C_{сер}$повинна встановлюватися відповідно до складу корму та мети експерименту.

Під час проведення лабораторних досліджень доцільно застосовувати однакову масу проби, однаковий комплект сит, однакову тривалість просіювання та однаковий спосіб підготовки матеріалу. Це забезпечує порівнюваність результатів різних режимів роботи обладнання.

РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

Гранулометричний склад як основний показник процесу подрібнення

Результати аналізу літературних джерел показують, що ступінь подрібнення доцільно оцінювати передусім за гранулометричним розподілом частинок. Використання лише одного середнього значення не дозволяє визначити, яким чином матеріал розподілений між дрібною та крупною фракціями.

Наприклад, два зразки можуть мати однаковий середній діаметр частинок, але перший зразок може характеризуватися переважанням частинок близького розміру, тоді як другий міститиме значну кількість як дуже дрібних, так і крупних частинок. З технологічної точки зору ці два зразки можуть поводитися по-різному під час змішування та транспортування. Саме тому результати ситового аналізу необхідно представляти у вигляді розподілу масових часток за фракціями. Такий підхід дозволяє визначити не тільки середній розмір, а й наявність технологічно небажаних крупних або надмірно дрібних частинок.

Lyu et al. (2020) наголошують, що різні методи визначення розміру частинок характеризують різні властивості матеріалу (таблиця 1). Сухе просіювання фактично характеризує можливість частинок проходити крізь отвори сит, тоді як лазерна дифракція та аналіз зображень дозволяють отримувати іншу інформацію про геометричні характеристики частинок.

Таблиця 1 – Порівняння методів визначення гранулометричного складу

Метод	Основний результат	Переваги	Основні обмеження	Доцільність використання
Сухе просіювання	Масова частка фракцій	Простота, доступність, невисока вартість	Можливе злипання дрібних частинок	Висока для сухої сировини
Мокре просіювання	Розподіл частинок після зволоження	Дає змогу враховувати поведінку матеріалу у водному середовищі	Складніша підготовка проби, можливі втрати розчинної фази	Висока для відповідних форм корму
Лазерна дифракція	Розподіл частинок за розміром	Висока деталізація та швидкість аналізу	Висока вартість обладнання	Лабораторні дослідження
Аналіз зображень	Розмір і форма частинок	Додаткова інформація про форму	Потребує спеціального програмного забезпечення	Дослідницькі роботи
Розрахунок середнього показника	Середній розмір	Зручний для порівняння	Не відображає повного розподілу	Додатковий показник

Примітка: жоден одиничний показник не повинен використовуватися як єдиний критерій оцінювання якості подрібнення.

Для технологічного контролю кормоприготувального обладнання ситовий метод залишається практично зручним, оскільки не потребує складного лабораторного обладнання та дозволяє безпосередньо визначити масу матеріалу в окремих фракціях.

Сухе та мокре просіювання

Методика підготовки проби має істотний вплив на отриманий результат. *Wolf et al. (2010)* встановили, що гранулометричний розподіл кормів залежить від способу просіювання. Для різних форм корму можуть бути необхідними різні методи підготовки проби. *Bertsch et al. (2022)* порівняли результати сухого та мокрого ситового аналізу комерційних кормів для свиней. Автори встановили, що під час мокрого просіювання частина матеріалу проходить крізь найдрібніше сито або переходить у розчинну фазу, що істотно впливає на розраховане середнє значення.

Тому під час дослідження рідкого корму необхідно чітко фіксувати методику підготовки проби. Якщо зразок після змішування з водою аналізують безпосередньо, результат характеризує вже не суху кормову сировину, а поведінку дисперсної системи у рідкій фазі. Для порівняння різних режимів роботи одного обладнання важливіше забезпечити однаковість методики, ніж змінювати спосіб аналізу залежно від отриманого результату.

Значення фракції дрібних частинок

Серед показників, які можуть характеризувати інтенсивність диспергування, особливе значення має частка дрібної фракції. У сучасному дослідженні *Aliiev et al. (2026)* для оцінювання роботи гомогенізатора-диспергатора рідкого корму досліджувалася залежність вмісту частинок розміром 0–0,5 мм від частоти обертання ротора, діаметра вхідного отвору статора та тривалості роботи обладнання. Паралельно аналізували індекс розшаровування, температуру суміші, потужність електродвигуна та енергетичні витрати.

Такий підхід є важливим з методичної точки зору, оскільки дозволяє не відокремлювати якість диспергування від енергетичних показників машини. Водночас фракція 0–0,5 мм не повинна розглядатися як універсальний нормативний показник для всіх кормів. Необхідний розмір частинок залежить від виду сировини, складу раціону, форми корму, вікової групи тварин та технології його використання. *Vukmirović et al. (2017)* узагальнили результати досліджень і показали, що для кормів свиней зменшення розміру частинок загалом може покращувати використання поживних речовин, але надмірно дрібна структура корму може мати негативні наслідки для шлунково-кишкового тракту.

Отже, збільшення частки частинок до 0,5 мм необхідно розглядати як один із критеріїв інтенсивності механічного впливу, а не як самостійну мету процесу.

Взаємозв'язок подрібнення та енергетичних витрат

Одним із ключових технологічних обмежень процесу подрібнення є енергоспоживання. Чим дрібнішого продукту необхідно досягнути, тим більшим, як правило, стає обсяг механічної роботи, необхідної для руйнування частинок. *Wondra et al. (1995)* встановили, що зменшення розміру частинок кукурудзи супроводжується збільшенням витрат електричної енергії та зменшенням продуктивності подрібнювання, особливо при переході до дуже дрібного подрібнення. *Thomas et al. (2018)* також показали, що енергетична ефективність залежить від типу подрібнювального обладнання та властивостей сировини. Тому порівнювати машини тільки за отриманою крупністю продукту некоректно. Необхідно враховувати, скільки енергії було витрачено для отримання відповідного гранулометричного складу. *Lyu et al. (2022)* встановили додатковий вплив вологості. Підвищення вологості досліджуваних матеріалів призводило до збільшення енергетичних витрат під час молоткового подрібнення. Це свідчить про необхідність контролю вологості вихідної сировини під час порівняння режимів роботи подрібнювального обладнання.

Отже, під час експериментального дослідження машини доцільно визначати не тільки продуктивність та гранулометричний склад, а й питомі енерговитрати за формулою (6).

Вплив рівномірності частинок

Не менш важливим параметром є рівномірність гранулометричного складу. *Wondra et al. (1995b)* досліджували кореляцію між однорідністю частинок, типом подрібнювача та показниками використання поживних речовин. За однакового або близького середнього розміру частинок більш

рівномірний матеріал може мати інші технологічні характеристики, ніж матеріал із широким діапазоном розмірів. Цей фактор має особливе значення для рідких кормів. Якщо кормова суміш містить значну кількість великих частинок, вони можуть швидше переміщуватися під дією сили тяжіння та осідати. Унаслідок цього склад корму у верхній та нижній частинах ємності може відрізнятися.

Таким чином, для оцінювання рідкого корму необхідно поєднувати гранулометричний аналіз із контролем однорідності суміші.

Технологічні властивості рідкого корму

Рідкий корм повинен забезпечувати можливість переміщення від змішувального обладнання до місця згодовування. Тому поряд із гранулометричним складом важливими є в'язкість, концентрація сухої речовини та стабільність дисперсної фази.

Beal et al. (2001) показали, що крупність зернових компонентів пов'язана з розміром частинок у рідкому кормі та його в'язкістю. Це підтверджує необхідність оцінювати процес подрібнення з урахуванням наступної технологічної операції. Надмірно крупні частинки можуть погіршувати стабільність суміші та збільшувати ризик їх осідання. З іншого боку, надмірне подрібнення може збільшувати енерговитрати без пропорційного покращення технологічних властивостей корму.

Тому оптимізація повинна бути спрямована на отримання такого гранулометричного складу, який забезпечує необхідну стабільність та транспортування корму при мінімально необхідних енергетичних витратах.

Комплексний підхід до контролю

На основі аналізу наукових публікацій доцільно використовувати комплекс показників, наведений у табл. 2.

Таблиця 2 – Показники технологічного контролю процесу подрібнення та диспергування

Показник	Позначення	Одиниця	Технологічне призначення
Масова частка дрібної фракції	w_i	%	Характеризує інтенсивність подрібнення
Масова частка крупної фракції	w_k	%	Виявляє недостатньо подрібнений матеріал
Середній розмір частинок	d_{mean}	мм або мкм	Узагальнює гранулометричний склад
Індекс розшаровування	I_s	%	Характеризує стабільність рідкої суміші
Продуктивність	Q	кг/год	Характеризує продуктивність обладнання
Потужність привода	P	кВт	Характеризує енергетичне навантаження
Питомі енерговитрати	e_s	кВт·год/кг або Дж/кг	Дає змогу порівнювати режими
Температура суміші	T	°C	Контролює теплове навантаження
Тривалість оброблення	t	с або хв	Характеризує тривалість механічного впливу

На першому етапі необхідно забезпечити репрезентативний відбір проби. Далі визначається гранулометричний склад та масові частки окремих фракцій.

Наступним етапом є визначення середнього розміру частинок. При цьому обов'язково потрібно зазначати методику розрахунку та набір сит, оскільки різні методи можуть давати різні результати *(Fritz et al., 2012; Lyu et al., 2020)*.

Після визначення гранулометричного складу оцінюють стабільність рідкої системи. Для цього можуть використовуватися показники концентрації сухої речовини, контрольної фракції або іншого маркерного компонента у різних шарах корму.

Завершальним етапом є визначення продуктивності та питомих енерговитрат. Такий алгоритм дозволяє уникнути ситуації, коли режим роботи обладнання оцінюють лише за одним показником.

Наприклад, збільшення частоти обертання ротора може призвести до збільшення частки дрібної фракції. Проте одночасно можуть збільшуватися потужність привода, температура корму та питомі енергетичні витрати. Тому лише збільшення частки дрібних частинок не є достатньою підставою для вибору режиму.

Оптимальним у технологічному розумінні є режим, який забезпечує необхідний гранулометричний склад та стабільність корму за прийнятної продуктивності та мінімально необхідних енерговитрат.

Запропонована послідовність контролю

Для практичного використання результатів аналізу пропонується така послідовність технологічного контролю(наведений у рис. 1.):

1. Відбір репрезентативної проби
2. Визначення загальної маси проби
3. Ситовий аналіз
4. Визначення маси кожної фракції
5. Розрахунок масових часток фракцій за формулою (1)
6. Визначення середнього розміру частинок
7. Визначення частки технологічно важливої фракції
8. Оцінювання однорідності та розшаровування рідкого корму
9. Визначення продуктивності та енергоспоживання
10. Розрахунок питомих енерговитрат
11. Порівняння отриманих показників із режимом роботи обладнання
12. Вибір технологічно доцільного режиму

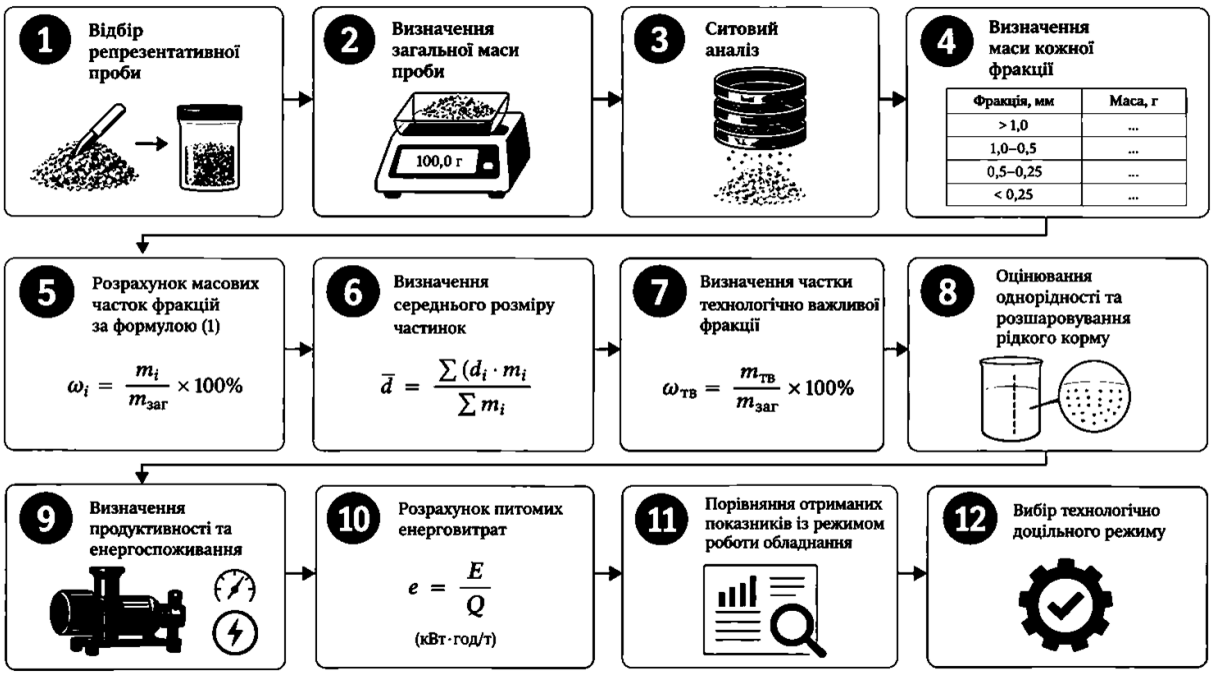

Рис. 1 – Послідовність контролю ступеня подрібнення кормової сировини під час приготування рідкого корму

Запропонована послідовність може бути використана як під час лабораторного дослідження, так і під час виробничого контролю. Її перевагою є можливість пов'язати конструктивно-технологічні параметри машини з якістю готової кормової суміші.

ПЕРСПЕКТИВИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ДОСЛІДЖЕННЯ

Огляд наукових джерел показує доцільність подальшого експериментального дослідження роботи подрібнювально-диспергувального обладнання.

Як фактори експерименту можуть бути обрані: частота обертання ротора; тривалість оброблення; розмір робочого зазору; діаметр вхідного отвору статора; продуктивність обладнання; вологість або концентрація вихідної сировини.

Як функції відгуку доцільно використовувати: масову частку частинок до 0,5 мм; масову частку крупної фракції; середній розмір частинок; індекс розшаровування; продуктивність; споживану потужність; питомі енерговитрати; температуру суміші.

Такий комплекс дозволить перейти від простого порівняння окремих режимів до математичного опису процесу. За наявності достатньої кількості експериментальних даних можливе побудування регресійних моделей, які описуватимуть залежність показників якості корму від конструктивно-технологічних параметрів машини. Водночас регресійні рівняння не повинні формуватися без фактичних експериментальних даних.

У межах цієї оглядової роботи числові коефіцієнти моделей не наводяться, оскільки їх створення без результатів вимірювань було б необґрунтованим.

ВИСНОВКИ

Ступінь подрібнення кормової сировини є важливим фактором, який визначає гранулометричний склад, фізичні властивості та технологічну придатність кормової суміші. Для рідкого корму його значення додатково визначається впливом розміру частинок на стабільність дисперсної системи та можливість її транспортування.

Оцінювання процесу лише за середнім розміром частинок є недостатнім. Для повної характеристики необхідно визначати масові частки окремих фракцій та аналізувати гранулометричний розподіл.

Ситовий аналіз є практично придатним методом технологічного контролю кормової сировини. Водночас під час порівняння результатів необхідно використовувати однакову методику підготовки проби, комплект сит та умови проведення аналізу.

Для рідких кормів спосіб просіювання має істотне значення. Результати мокрого та сухого аналізу можуть відрізнятися, тому вибір методики повинен відповідати фізичному стану досліджуваного матеріалу та меті дослідження.

Фракція частинок розміром до 0,5 мм може бути використана як один із показників інтенсивності диспергування. Однак її не слід розглядати як універсальний нормативний критерій для всіх видів кормової сировини та раціонів.

Інтенсивність подрібнення необхідно оцінювати у взаємозв'язку з енергетичними витратами. Збільшення частки дрібних частинок не завжди означає підвищення технологічної ефективності, якщо воно супроводжується непропорційним збільшенням енергоспоживання.

Для оцінювання роботи подрібнювально-диспергувального обладнання доцільно застосовувати комплекс показників: гранулометричний склад, частку технологічно важливих фракцій, середній розмір частинок, індекс розшаровування, продуктивність, потужність, питомі енерговитрати та температуру суміші.

Запропонована послідовність технологічного контролю дозволяє оцінювати режим роботи обладнання не за максимальним ступенем подрібнення, а за досягненням необхідної структури корму при прийнятних енергетичних витратах.

Подальші дослідження доцільно спрямувати на експериментальне встановлення залежностей між частотою обертання робочих органів, тривалістю оброблення, конструктивними параметрами диспергувального обладнання (таблиця 3), гранулометричним складом, стабільністю рідкого корму та питомими енерговитратами.

Таблиця 3 – Рекомендований комплекс показників для оцінювання режимів роботи диспергувального обладнання

Група показників	Показник	Основне питання, на яке відповідає
Гранулометричні	Масова частка фракції до 0,5 мм	Наскільки інтенсивно відбувається диспергування?
Гранулометричні	Масова частка крупної фракції	Чи залишається недостатньо подрібнений матеріал?
Гранулометричні	Середній розмір частинок	Яка узагальнена крупність матеріалу?
Стабільність	Індекс розшаровування	Наскільки стабільна суміш?
Продуктивність	Q	Скільки корму обробляється за одиницю часу?
Енергетичні	P	Яке навантаження на привод?
Енергетичні	e_s	Скільки енергії витрачається на одиницю продукції?
Теплові	T	Чи не виникає надмірне нагрівання корму?

СПИСОК ПОСИЛАНЬ

Aliiev, E., Malehin, R., Aliieva, O., Yaropud, V., Kukharets, S., Pidlisnyj, V., Horetska, I., Kielbasa, P., & Hutsol, T. (2026). Development of a homogenizer-disperser of liquid fodder for pigs. Scientific Reports, 16, 14127. https://doi.org/10.1038/s41598-026-44547-9

Beal, J. D., Niven, S. J., Brooks, P. H., & Gill, B. P. (2001). Relationship between fineness of grind of cereals and particle size in, and viscosity of, liquid diets for pigs. Proceedings of the British Society of Animal Science, 2001, 9. https://doi.org/10.1017/S1752756200003914

Bertsch, M., Terranova, M., Kreuzer, M., & Clauss, M. (2022). Particle size distribution in commercial pig compound feeds in Switzerland: Survey and methodological considerations. Schweizer Archiv für Tierheilkunde, 164(9), 635–644. https://doi.org/10.17236/sat00366

Fritz, J., Streich, W. J., Schwarm, A., & Clauss, M. (2012). Condensing results of wet sieving analyses into a single data: A comparison of methods for particle size description. Journal of Animal Physiology and Animal Nutrition, 96(5), 783–797. https://doi.org/10.1111/j.1439-0396.2011.01183.x

Lyu, F., Hendriks, W. H., van der Poel, A. F. B., & Thomas, M. (2022). Particle size distribution, energy consumption, nutrient composition and in vitro ileal digestion characteristics of hammer milled maize and soybean meal affected by moisture content. Animal Feed Science and Technology, 288, 115317. https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2022.115317

Lyu, F., Thomas, M., Hendriks, W. H., & van der Poel, A. F. B. (2020). Size reduction in feed technology and methods for determining, expressing and predicting particle size: A review. Animal Feed Science and Technology, 261, 114347. https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2019.114347

Thomas, M., Hendriks, W. H., & van der Poel, A. F. B. (2018). Size distribution analysis of wheat, maize and soybeans and energy efficiency using different methods for coarse grinding. Animal Feed Science and Technology, 240, 11–21. https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2018.03.010

Vukmirović, Đ., Čolović, R., Rakita, S., Brlek, T., Đuragić, O., & Solà-Oriol, D. (2017). Importance of feed structure (particle size) and feed form (mash vs. pellets) in pig nutrition – A review. Animal Feed Science and Technology, 233, 133–144. https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2016.12.016

Wolf, P., Rust, P., & Kamphues, J. (2010). How to assess particle size distribution in diets for pigs? Livestock Science, 133(1–3), 78–80. https://doi.org/10.1016/j.livsci.2010.06.030

Wondra, K. J., Hancock, J. D., Behnke, K. C., & Stark, C. R. (1995a). Effects of mill type and particle size uniformity on growth performance, nutrient digestibility, and stomach morphology in finishing pigs. Journal of Animal Science, 73(9), 2564–2573. https://doi.org/10.2527/1995.7392564x

Wondra, K. J., Hancock, J. D., Behnke, K. C., Hines, R. H., & Stark, C. R. (1995b). Effects of particle size and pelleting on growth performance, nutrient digestibility, and stomach morphology in finishing pigs. Journal of Animal Science, 73(3), 757–763. https://doi.org/10.2527/1995.733757x