УДК: 664.788:631.363

МОДЕЛЮВАННЯ ТЕХНОЛОГІЧНОЇ ЛІНІЇ КОМБІКОРМОВОГО ВИРОБНИЦТВА МАЛИХ ФОРМ ВЛАСНОСТІ З УРАХУВАННЯМ ЕНЕРГОЄМНОСТІ ПОДРІБНЕННЯ ТА ГРАНУЛОМЕТРИЧНОГО СКЛАДУ ПРОДУКТУ

Олена Горбенко

Миколаївський національний аграрний університет, м. Миколаїв, Україна,

Підприємства малих форм власності, що виробляють комбікорми для власних ферм, експлуатують спрощені технологічні лінії: приймання й очищення зерна, дозування компонентів, подрібнення, змішування та відвантаження. Основну частку електроенергії споживає подрібнення, а гранулометричний склад подрібненого зерна визначає однорідність суміші та якість комбікорму [1]. Режими окремих апаратів зазвичай призначають за довідковими даними, не враховуючи їхньої взаємодії в складі лінії, що призводить до недовантаження обладнання, простоїв і підвищених питомих витрат енергії.

Аналіз публікацій. Енергетичні моделі подрібнення дозволяють прогнозувати розподіл частинок за розмірами та знаходити надлишкові витрати енергії [2, 3]; вологість зерна впливає на енерговитрати та механізм руйнування [4]; оптимізація режимних параметрів молоткових дробарок підвищує продуктивність і зменшує енергоємність [5]. Разом із тим питання узгодження режиму дробарки з організацією всієї лінії розглядається рідше. Мета роботи – запропонувати модель, що поєднує рівні апарата та лінії.

Структуру лінії та рівні моделювання показано на рис. 1. Центральним апаратом є зернодробарка з ротором і подрібнювальними елементами зі скошеною кромкою, чотирисекторною камерою (завантаження, перша дека, решето, друга дека) та поверненням недоподрібнених частинок на повторну обробку [5].

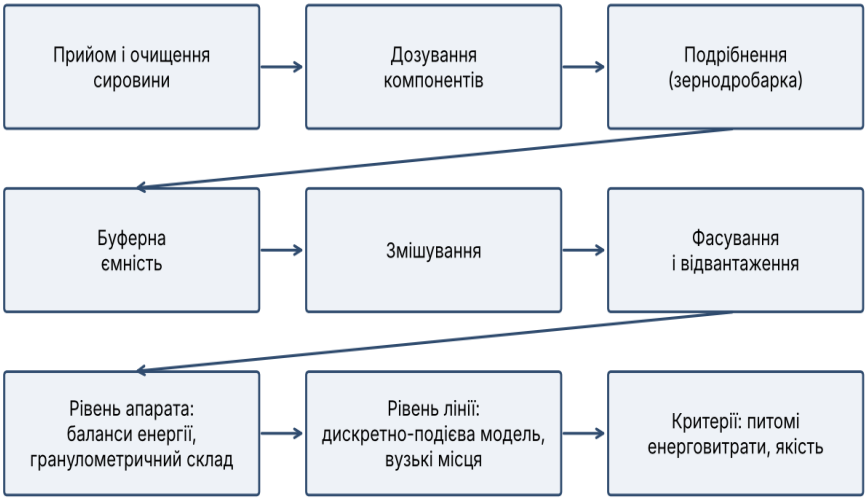


Рис. 1. Технологічна лінія та рівні моделювання (схема розроблена авторами)

На рівні апарата застосовують баланс мас і енергії. Для безперервного режиму

$$G_{вх} = G_г + G_п + dM / dt, \quad W = P / Q, \tag{1}$$

де $G_{вх}$ – подача матеріалу, $G_г$ – потік готової фракції, $G_п$ – потік, що повертається на повторне подрібнення, M – маса матеріалу в камері, W – питомі енерговитрати (кВт·год/т), P – споживана потужність (кВт), Q – продуктивність за готовою фракцією (т/год). Зв’язок енергії зі зменшенням розміру частинок оцінюють за залежністю Бонда [6]:

$$E = 10\, W_i \cdot (1/\sqrt{P_{80}} - 1/\sqrt{F_{80}}), \tag{2}$$

де W_i – робочий індекс Бонда, F_{80} і P_{80} – розміри, через які проходить 80 % маси вихідного й подрібненого матеріалу, мкм.

Розподіл частинок за розмірами описують законом Розіна-Раммлера [7] і характеризують модулем помелу:

$$R(d) = exp[-(d / d_e)^m], \quad M_n = \Sigma\, d_i\, m_i / \Sigma\, m_i, \tag{3}$$

де R(d) – частка матеріалу, що залишається на сіті з розміром отвору d, d_e та m – параметри розподілу, d_i – середній розмір i-ї фракції, m_i – її маса. Стан сировини, насамперед вологість, змінює параметри W_i та d_e [4].

Залежність показників дробарки від подачі, за розрахунковою моделлю [5], має вигляд, наведений на рис. 2: продуктивність за готовою фракцією зростає майже пропорційно подачі, досягає максимуму в зоні q ≈ 500–520 кг/год і далі зменшується через перевантаження сектора решета та ефект «подушки»; питомі витрати W мають мінімум (3,75–3,85 кВт·год/т) у діапазоні 480–520 кг/год, що для Q ≈ 0,44 т/год відповідає потужності P = W·Q ≈ 1,7 кВт. Графік у [5] побудовано за розрахунковою моделлю з умовними точками для ілюстрації, тому ці значення потребують експериментальної перевірки.

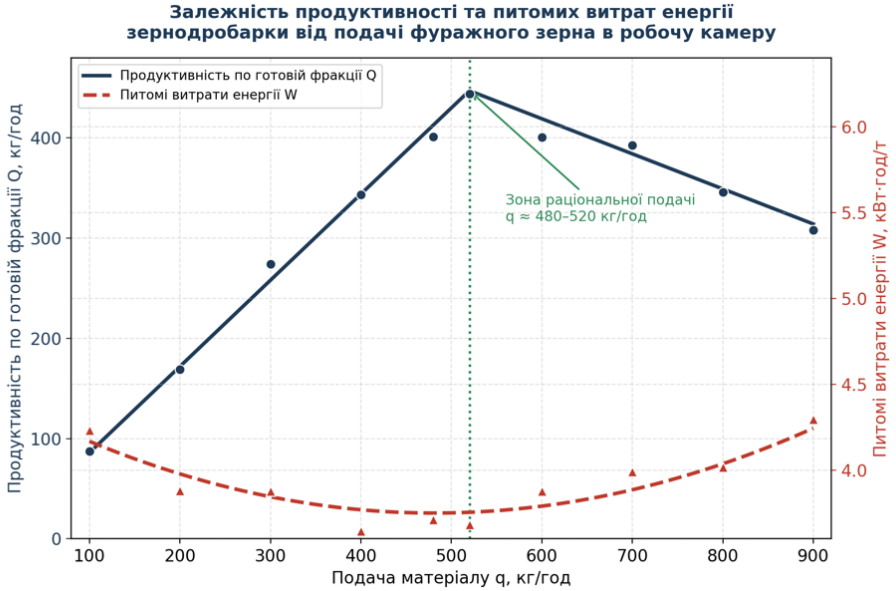


Рис. 2. Залежності продуктивності Q та питомих витрат енергії W від подачі q (за [5])

Імітаційна модель лінії. Рівень лінії описують дискретно-подієвою моделлю [8], у якій кожен апарат подано подією з певною тривалістю й можливістю відмови; вхідними є інтенсивність надходження сировини, продуктивність апаратів, місткість буфера та правила керування. Пропускна здатність послідовної лінії обмежується найменшою ефективною продуктивністю апарата:

$$Q_{лін} = min(Q_j \cdot K_{г,j}), \quad K_г = T_0 / (T_0 + T_в), \tag{4}$$

де Q_j – номінальна продуктивність j-го апарата, $K_{г,j}$ – коефіцієнт готовності, T_0 – наробіток на відмову, $T_в$ – середній час відновлення. Для контролю імітації використовують аналітичні співвідношення теорії масового обслуговування – формулу Літтла та коефіцієнт завантаження:

$$L = \lambda \cdot W_ч, \quad \rho = \lambda / (c \cdot \mu), \tag{5}$$

де L – середня кількість одиниць у системі, λ – інтенсивність потоку, $W_ч$ – середній час перебування, c – кількість однакових апаратів, μ – інтенсивність обслуговування. При ρ → 1 черги зростають нелінійно, що пояснює, чому лінія зі «збалансованими» за середніми значеннями апаратами працює нижче розрахункової потужності. Загальну ефективність обладнання оцінюють показником OEE = A·P·Y, де A – готовність, P – продуктивність, Y – якість. Модель дозволяє виявити вузькі місця: якщо продуктивність змішувача нижча, ніж дробарки, буферна ємність

заповнюється, дробарка блокується і її завантаження падає; якщо ж подача мала, вона працює в зоні недовантаження з підвищеними питомими витратами (рис. 2).

Оптимізація режиму лінії. Питомі енерговитрати лінії та задачу оптимізації формалізують таким чином:

$$W_{лін} = \Sigma P_j t_j / M_n, \quad W_{лін} \rightarrow min \ \ за \ \ M_n \in [M_{min}, M_{max}], \ \ Q_{лін} \geq Q_{min}, \qquad (6)$$

де P_j і t_j – потужність і час роботи j-го апарата за зміну, $M_п$ – маса виробленого продукту; обмеження за модулем помелу відображають вимоги до гранулометричного складу, а $Q_{лін}$ – до пропускної здатності. Змінними є подача, частота обертання ротора, кількість елементів на роторі, місткість буфера та послідовність виконання партій. Результат перевіряють на чутливість до коливань вологості та складу сировини й порівнюють із даними роботи реальної лінії за зміну. Для малого підприємства важливий економічний ефект: зменшення $W_{лін}$ знижує собівартість корму, а збільшення ресурсу робочих органів – витрати на їх заміну.

Сформовано цикл із трьох завдань: (1) розрахувати баланс мас і енергії, модуль помелу й питомі енерговитрати для заданого режиму дробарки; (2) побудувати спрощену імітаційну модель лінії та знайти вузьке місце; (3) обґрунтувати режим і розмір буфера за мінімумом $W_{лін}$ з обмеженнями.

Висновки. 1) Дворівнева модель – апарат і лінія – дозволяє узгодити режим подрібнення з організацією всієї технологічної лінії малого комбікормового підприємства. 2) За розрахунковою моделлю режим дробарки доцільно підтримувати у проміжній зоні подачі, де продуктивність найвища, а питомі енерговитрати найнижчі; це положення потребує експериментальної перевірки. 3) Імітаційний рівень виявляє вузькі місця та дозволяє обґрунтувати місткість буфера до придбання обладнання. 4) Запропонований цикл завдань придатний для практичних занять і курсового проєктування.

Список використаних джерел

1. Elbendari A. M., Ibrahim S. S. Optimizing key parameters for grinding energy efficiency and modeling of particle size distribution in a stirred ball mill. Scientific Reports. 2025. Vol. 15. Art. 3374.

2. Martelli S., Di Nunzio P. E. Powder ball milling: An energy balance approach to particle size reduction. arXiv. 2024. arXiv:2409.20202.

3. Castillo Alvarez Y., Jiménez Borges R., Monteagudo Yanes J. P. et al. Mathematical model to improve energy efficiency in hammer mills in feed industry. Processes. 2025. Vol. 13, no. 5. Art. 1523.

4. Kalandarov P., Khayitov A., Sharifov H., Murodova G. Study on the effect of grain moisture on grinding efficiency. E3S Web of Conferences. 2024. Vol. 497. Art. 03025.

5. Доценко Н. А., Горбенко О. А., Садовий О. С., Баранова О. В. Проєктування енергоефективного обладнання для подрібнення фуражного зерна для комбікормового виробництва з оптимізацією конструкційних і технологічних параметрів. Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин. 2026. Вип. 56. С. 243–255.

6. Bond F. C. The third theory of comminution. Transactions of AIME. 1952. Vol. 193. P. 484–494.

7. Rosin P., Rammler E. The laws governing the fineness of powdered coal. Journal of the Institute of Fuel. 1933. Vol. 7. P. 29–36.

8. Law A. M. Simulation Modeling and Analysis. 5th ed. New York : McGraw-Hill Education, 2015.

УДК: 631.363:519.876.5

СИСТЕМНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРИ КОНСТРУЮВАННІ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНИХ ЗЕРНОДРОБАРОК: СТРУКТУРНО-ФУНКЦІОНАЛЬНА МОДЕЛЬ РОБОЧОЇ КАМЕРИ ТА БАГАТОКРИТЕРІАЛЬНИЙ ВИБІР ПАРАМЕТРІВ

Наталія Доценко

Миколаївський національний аграрний університет, м. Миколаїв, Україна

Конструктивні рішення обладнання для подрібнення фуражного зерна мають забезпечувати високу якість подрібнення за мінімальних витрат електроенергії; водночас існуючі молоткові