

## АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ПРОЦЕСУ ПОДРІБНЕННЯ ЗЕРНА

**О.В. Соломка, асистент**

*(Національний університет біоресурсів і природокористування України)*

*В статті наведені результати експериментальних досліджень процесу подрібнення зернових матеріалів шляхом прикладання ударних навантажень та визначені раціональні параметри і режими роботи розробленого подрібнювача при заданому модулю помелу*

**Постановка проблеми.** Подрібнення зернових матеріалів підвищує ефективність їх використання: дрібні частки корму швидше та повніше засвоюються тваринами, краще перетравлюються, знижуються затрати енергії на процес розжовування його тваринами. Але в процесі подрібнення утворюється значна кількість пиловидних складових, які під дією шлункового соку утворюють грудки, що погано засвоюються тваринами. Тому подрібнювачі зернових матеріалів повинні забезпечити відповідний модуль помелу (в залежності від виду тварин) з мінімальним вмістом пиловидної фракції. Особливо це питання актуальне на сучасному етапі розвитку сільськогосподарського виробництва, коли вектор розвитку тваринництва України перемістився в дрібні фермерські господарства з невисокими добовими потребами в подрібнених зернових інгредієнтах, що передбачає розробку малогабаритних подрібнювачів, здатних при незначних енергетичних затратах забезпечити господарства концентрованими кормами високої якості.

Експериментальні дослідження проводилися на базі Національного наукового центру «Інститут механізації і електрифікації сільського господарства» відповідно до державної науково-технічної програми 40.03-028 «Удосконалити технологічні процеси, розробити технічні засоби для утримання тварин і птиці, приготування і роздачі кормів та уточнити систему типорозмірних рядів машин і обладнання», номер державної реєстрації 0106U011565.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Для подрібнення зернових компонентів в існуючих лініях приготування комбікормів застосовується принцип руйнування з стиранням, який здійснюється переважно молотковими подрібнювачами з шарнірним кріпленням молотків до роторів. Такі подрібнювачі є досить енергоємними і схильними до переподрібнення зернових матеріалів, внаслідок чого отримується значна частина мучнистого пилу, який не можна використовувати для годівлі худоби та птиці в натуральному вигляді. Тому на спеціалізованих підприємствах по виробництву комбікормів вимушено введена операція гранулювання, яка є досить енергоємною, а сам процес гранулювання супроводжується значним нагріванням інгредієнтів, що призводить до втрати їх поживних властивостей.

Значний вклад в розвиток теорії подрібнення зернових матеріалів внесли В.П. Топячев, С.В. Мельников, Г.М. Кукта, І.І. Ревенко, О.М. Пилипенко та ряд інших вчених. Але питання аналізу руху матеріалу в робочий камері подрібнювача під дією повітряного потоку до зустрічі з робочим органом та після співудару з молотками, визначення раціонального місця подачі та вивантаження матеріалу досліджені не достатньо повно.

Для зниження енергоємності процесу та отримання крупки різного ступеня подрібнення з незначною кількістю пиловидної фракції в в ННЦ «ІМЕСГ» розроблений малогабаритний подрібнювач зернових матеріалів, який складається з корпусу, ротора з бильними елементами, бункера-дозатора, привода та рами. Попередні дослідження запропонованої конструкції подрібнювача показали ефективність його застосування, але для визначення раціональних параметрів та режимів роботи подрібнювача на різних зернових матеріалах необхідно провести експериментальні дослідження, прийнявши в якості критерію оптимізації модуль помелу [1].

**Мета досліджень.** Обґрунтувати раціональні параметри та режими роботи енергоощадного подрібнювача зерна, здатного забезпечити відповідний модуль помелу в залежності від виду тварин з мінімальним вмістом пиловидної фракції.

**Результати досліджень.** Конструювання технічних засобів для подрібнення зернових матеріалів та визначення їх раціональних параметрів і режимів роботи повинні здійснюватися з врахуванням фізико-механічних властивостей цих матеріалів. Природна механічна міцність зерна коливається в широких межах залежно від культури, сорту, вологості зерна та його розмірів. Опір руйнуванню зернини залежить від внутрішнього та зовнішнього механічного пошкодження зерна. В залежності від напрямку прикладання числові значення руйнівних сил стискання зернини відрізняються: в разі статичного стискання зерна різних культур менш міцні у поздовжньому напрямку. Найміцнішим є зерно кукурудзи, найменш міцним – вівса [2].

Показники міцності зерна залежать від багатьох чинників і змінюються в значних межах, тому цю обставину слід враховувати при аналізі роботи подрібнювального пристрою.

В процесі проведення експериментальних досліджень визначалась якість процесу подрібнення зернового матеріалу, а також оцінювалися енергетичні параметри процесу подрібнення.

Якість подрібнення зернових матеріалів оцінювали за середнім модулем помелу. Для цього подрібнений матеріал, отриманий в результаті кожного дослідження, пересівали через набір сит. Після цього визначали вагу кожної фракції і середній модуль помелу за виразом:

$$M = \frac{\sum_{k=1}^{k=n} d_{ck} \cdot m_k}{\sum_{k=1}^{k=n} m_{nk}},$$

де  $M$  – модуль помелу зернового матеріалу, мм;

$d_{cn}$  – середнє значення діаметру часток  $k$ -тої фракції, мм;

$m_k$  – маса часток  $k$ -тої фракції, г.;

$n$  – кількість фракцій, приймаємо  $n = 6$  шт.

Проби розділялися за розмірами на 6 фракцій на комплекті лабораторних сит, потім кожна фракція зважувалася і визначався її процентний вміст в загальній масі навіски (згідно з типовою методикою).

За допомогою пакету прикладних програм Microsoft Excel 2003 в кожній  $i$ -ій точці визначали дисперсію відтворюваності одиничного результату [2]:

$$S_u^2 = \frac{1}{m_0 - 1} \cdot \sum_{i_n=1}^{m_0} (Y_{i_n} - \bar{Y}_u)^2,$$

де  $i_n$  – номер повторюваності;

$m_0$  – кількість повторювань дослідів;

$Y_{i_n}$  – вихідне значення при  $i_n$ -й повторюваності;

$\bar{Y}_u$  – середнє вихідне значення в кожному досліді;

$u$  – номер дослідів.

Перевіряємо повторюваність за критерієм Кохрена, значення якого визначається з відношення максимальної дисперсії до суми дисперсій:

$$G = \frac{S_{u_{\max}}^2}{\sum_{u=1}^n S_u^2}.$$

Знаходимо з одержаних значень дисперсії максимальне її значення  $S_{u_{\max}}^2 = 0,0032$  і суму всіх дисперсій  $\sum_{u=1}^n S_u^2 = 0,0299$ . Тоді  $G = 0,107$ . Критичне значення критерію обираємо з таблиці розподілу Кохрена за числом ступенів вільності  $f_u = m_0 - 1 = 2$  при кількості дослідів  $n = 28$  і статистичній надійності  $p = 0,95$ . Табличне значення становить  $G_T = 0,24$ , оскільки  $G < G_T$ , то гіпотеза про однорідність дисперсій приймається і процес відтворюється.

Для складання математичної моделі процесу руйнування зерна використали функцію у вигляді неповного квадратного полінома [3]:

$$y = b_0 + b_1 \cdot x_1 + \dots + b_6 \cdot x_6 + b_{11} \cdot x_1^2 + \dots + b_{66} \cdot x_6^2 + \\ + b_{12} \cdot x_1 \cdot x_2 + \dots + b_{56} \cdot x_5 \cdot x_6,$$

де  $x_i$  – кодовані фактори,  $i = 1 \dots 6$ ;

$b_0, b_1 \dots b_6, b_{11} \dots b_{66}$  – коефіцієнти для відповідних значень  $x$ .

Коефіцієнти регресії визначаємо за такими залежностями:

$$\begin{cases} b_o = \frac{1}{n} \cdot \sum_{u=1}^n \bar{Y}_u; \\ b_i = \frac{1}{n} \cdot \sum_{u=1}^n x_{iu} \cdot \bar{Y}_u; \\ b_o = \frac{1}{n} \cdot \sum_{u=1}^n x_{iu} \cdot x_{ju} \cdot \bar{Y}_u, \end{cases}$$

де  $x_{iu}, x_{ju}$  – значення  $i$ -го та  $j$ -го кодovаних факторів в  $u$ -му досліді відповідно.

Для визначення коефіцієнтів рівняння регресії застосовували пакет прикладних програм Wolfram Mathematica v.7. Одержані в результаті розрахунків значення наведені в таблиці 1.

Оцінка значущості коефіцієнтів регресії здійснюється за допомогою критерію Ст'юдента [3]. Коефіцієнт вважається значущим, якщо:

$$|b_a| \geq \Delta b_a = t(0,05; f_y) \cdot S_{(b_i)},$$

де  $b_a$  – коефіцієнти  $b_0, b_i, b_{ij}$ ;

$\Delta b_a$  – довірча межа;

$t(0,05; f_y)$  – критерій Ст'юдента при рівні значущості 5% та числі ступенів вільності дисперсії відтворюваності  $f_y = n \cdot (m_0 - 1)$ ;

$S_{b_i}$  – похибка коефіцієнтів регресії.

Таблиця 1. Коефіцієнти рівняння регресії

Коеф.	Значення	Коеф.	Значення	Коеф.	Значення	Коеф.	Значення
$b_0$	1,503	$b_{11}$	0,368	$b_{13}$	-0,164	$b_{26}$	-0,152
$b_1$	-0,080	$b_{22}$	0,130	$b_{14}$	-0,156	$b_{34}$	-0,064
$b_2$	0,087	$b_{33}$	-0,470	$b_{15}$	-0,159	$b_{35}$	-0,247
$b_3$	0,187	$b_{44}$	0,095	$b_{16}$	-0,056	$b_{36}$	0,028
$b_4$	0,242	$b_{55}$	0,385	$b_{23}$	-0,174	$b_{45}$	-0,127
$b_5$	0,113	$b_{66}$	-0,133	$b_{24}$	-0,071	$b_{46}$	-0,277
$b_6$	0,240	$b_{12}$	-0,126	$b_{25}$	0,003	$b_{56}$	-0,111

Спочатку визначаємо середню дисперсію відтворюваності одиничного результату (середньоарифметичну для всього експерименту):

$$S_y^2 = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n S_u^2,$$

$$S_y^2 = \frac{1}{28} \cdot \sum_{i=1}^n S_u^2 = 0,0011.$$

Середня дисперсія відтворюваності середнього значення виходу процесу (середньоарифметичне для всього експерименту):

$$S_{(\bar{y})}^2 = \frac{S_y^2}{m_0},$$

$$S_{(\bar{y})}^2 = \frac{0,0011}{3} \approx 0,0004.$$

Вибіркова дисперсія коефіцієнтів регресії:

$$S_{(b_i)}^2 = \frac{S_{(\bar{y})}^2}{n},$$

$$S_{(b_i)}^2 = \frac{0,0004}{28} = 0,13 \cdot 10^{-4}.$$

Визначаємо похибку відтворення:

$$S_{(b_i)} = \sqrt{S_{(b_i)}^2},$$

$$S_{(b_i)} = \sqrt{0,13 \cdot 10^{-4}} = 0,0036.$$

Приймаємо рівень значимості, що характеризує ступінь достовірності, рівним 5% при довірчій ймовірності  $\alpha = 0,95$ . Число ступенів свободи при визначенні середньої дисперсії відтворюваності одиничного результату:

$$f_y = n \cdot (m_0 - 1),$$

$$f_y = 28 \cdot (3 - 1) = 56.$$

В залежності від прийнятого рівня значимості та кількості ступенів вільності знаходимо значення критерію  $t$  за таблицею розподілу Ст'юдента -  $t = 2,0$ .

Коефіцієнти рівняння регресії  $b_i$  можна вважати значимими, якщо виконується нерівність:

$$|b_a| \geq \Delta b_a = 2,0 \cdot 0,0036 = 0,0072.$$

В рівнянні регресії коефіцієнтами, які менші довірчої межі нехтуємо. В даному випадку незначущим коефіцієнтом є  $b_{25} = 0,003$ .

Перевірку адекватності вибраної математичної моделі (відповідність одержаної моделі реальному процесу) проводимо за критерієм Фішера [3]. Адекватність має місце, якщо виконується умова:

$$F = \frac{S_{ad}^2}{S_y^2} < F(0,05; f_{ad}; f_y),$$

де  $S_{ad}^2$  – дисперсія адекватності;

$F(0,05; f_{ad}; f_y)$  – критерій Фішера при рівні значимості 5%;

$f_{ad}$  – число ступенів вільності ( $f_{ad} = n - k - 1 = 28 - 6 - 1 = 21$ );

$n$  – кількість дослідів;

$k$  – кількість факторів у досліді.

Дисперсія адекватності визначається наступним чином:

$$S_{ad}^2 = \frac{1}{n - k - 1} \cdot \sum_{u=1}^n (Y_T - Y_u)^2,$$

де  $Y_T$  – розрахункове значення відгуку в  $i$ -му досліді.

$$\begin{aligned} S_{ad}^2 = & \frac{1}{21} \cdot \left( (1,79 - 1,79)^2 + (1,72 - 1,72)^2 + (1,22 - 1,22)^2 + (1,84 - 1,84)^2 + \right. \\ & + (2,00 - 2,00)^2 + (1,61 - 1,61)^2 + (2,297 - 2,30)^2 + (1,683 - 1,68)^2 + \\ & + (1,677 - 1,68)^2 + (1,717 - 1,72)^2 + (1,873 - 1,87)^2 + (1,467 - 1,47)^2 + \\ & + (1,113 - 1,11)^2 + (1,357 - 1,36)^2 + (1,647 - 1,65)^2 + (1,273 - 1,27)^2 + \\ & + (2,577 - 2,580)^2 + (1,967 - 1,97)^2 + (1,373 - 1,37)^2 + (2,113 - 2,11)^2 + \\ & \left. + (2,043 - 2,04)^2 + (1,373 - 1,37)^2 + (2,467 - 2,47)^2 = \frac{0,00015}{21} = 0,73 \cdot 10^{-5} \right) \end{aligned}$$

Підставивши одержане значення дисперсії адекватності в попередній вираз, отримаємо  $F = \frac{S_{ad}^2}{S_y^2} = \frac{0,73 \cdot 10^{-5}}{0,0004} = 0,018$ , табличне значення критерію

Фішера  $F(0,05; f_{ad}; f_y) = 1,84$ . Нерівність  $F_p < F_T$  виконується ( $0,018 < 1,84$ ), тому робимо висновок, що вибрана математична модель адекватна і відповідає реальному процесу.

Кінцевий вигляд рівняння регресії прийме після переходу від кодованих до натуральних величин:

$$\begin{aligned} M = & -0,82 + 0,03 \cdot d^2 + 0,02 \cdot n^2 + 0,09 \cdot q - 0,21 \cdot 10^{-3} \cdot q^2 + 10,82 \cdot \alpha + \\ & - 6,84 \cdot \alpha^2 + 0,13 \cdot \beta - 0,28 \cdot 10^{-2} \cdot q \cdot \beta - 0,60 \cdot \alpha \cdot \beta + 0,16 \cdot \beta^2 + \\ & + n \cdot \left( 0,97 - 0,55 \cdot 10^{-2} \cdot q - 0,12 \cdot \alpha - 0,04 \cdot \beta - 0,15 \cdot 10^{-2} \cdot \omega \right) + d \cdot \left( 0,49 - 0,02 \cdot n - \right. \\ & \left. - 0,30 \cdot 10^{-2} \cdot q - 0,33 \cdot \alpha - 0,12 \cdot \omega \right) - 0,05 \cdot \omega - 0,43 \cdot 10^{-4} \cdot q \cdot \omega - 0,01 \cdot \alpha \cdot \omega - \\ & - 0,20 \cdot \beta \cdot \omega + 0,14 \cdot 10^{-3} \cdot \omega^2. \end{aligned}$$

За одержаним рівнянням регресії будуюмо поверхні відгуку та їх перерізи, що характеризують залежність критерію оптимізації (модулю помелу) від

змінних факторів (параметрів і режимів роботи подрібнювача) Приклад побудови такої поверхні наведено на рис. 1.

Аналіз поверхні (рис.1) показує, що зі збільшенням кутової швидкості обертання лопатки  $\omega$  модуль помелу спочатку зменшується, а потім знову починає зростати, що пояснюється видуванням пиловидної фракції за рахунок вентиляторного ефекту подрібнювача і, як наслідок, призводить до втрат зерна. Збільшення кута нахилу лопатки до напрямку обертання  $\alpha$  навпаки, спочатку підвищує модуль помелу, а потім він починає зменшуватись внаслідок зростання частки пиловидної фракції, яка утворюється за рахунок збільшення швидкості обертання зерно-повітряної суміші в камері подрібнювача.

Аналогічно аналізували вплив інших змінних факторів на модуль помелу. На основі аналізу визначали раціональні параметри і режими роботи подрібнювача зернових матеріалів в залежності від зоотехнічних вимог та фізико-механічних властивостей сировини.

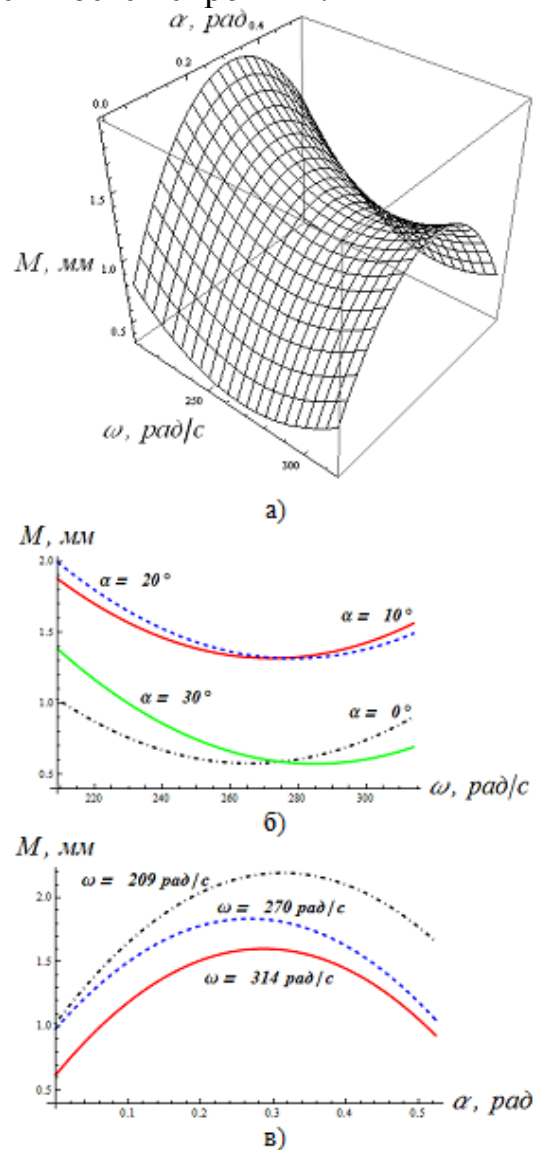


Рис. 1. Поверхня залежності модуля помелу від кутової швидкості і кута нахилу лопаток (а) та її перерізи (б, в)

**Висновки.** В результаті проведення експериментальних досліджень встановлено, що подрібнення зернових компонентів в розробленій дробарці відбувається, в основному, в результаті косою вільного удару лопаткою, що дозволяє одержувати крупку фіксованого розміру з незначним вмістом мучнистої пиловидної фракції.

На основі дослідження математичної моделі процесу руйнування зерна шляхом аналізу поверхонь відгуку визначили раціональні параметри і режими роботи подрібнювача в залежності від заданого модуля помелу та виду і фізико-механічних властивостей зернового матеріалу.

## **Список використаних джерел**

1. Соломка О.В. Обґрунтування конструктивних параметрів дискового подрібнювача зерна. Праці ТДАУ. Вип. 9, т. 3. Мелітополь, 2009, стор. 40-47
2. Механіко-технологічні властивості сільськогосподарських матеріалів: Підручник// О.М. Царенко, Д.Г. Войтюк, В.М. Швайко та ін. За ред. С.С. Яцуна. - К.: Мета, 2003. – 448 с.
3. Адлер Ю.П. Планирование эксперимента при поиске оптимальных решений / Ю.П. Адлер, Е.В. Макаров, Ю.В. Грановский.– М.: Наука.- 1986. – 215с.

## **Аннотация**

### **Анализ результатов экспериментальных исследований процесса измельчения зерна**

А.В. Соломка

*В статье приведены результаты экспериментальных исследований процесса измельчения зерновых материалов путем приложения ударных нагрузок и определены рациональные параметры и режимы работы разработанного измельчителя при заданном модуле помола*

## **Abstract**

### **Analysis of results of experimental investigation of grain grinding**

A. Solomka

*The results of experimental investigations of the process of grinding grain materials by applying a shock load and defined rational parameters and operating modes of the shredder designed for a given module grade*