

## ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ПОДРІБНЕННЯ ЗЕРНА УДАРНО-СЕПАРАЦІЙНИМ ПОДРІБНЮВАЧЕМ

**В. В. Сердюк**, асистент,

**В. А. Руденко**, к.т.н., доцент.

Сумський національний аграрний університет

У статті наведені результати експериментальних досліджень процесу подрібнення зернових матеріалів шляхом прикладення ударних навантажень та визначені раціональні параметри та режими роботи розробленого подрібнювача при заданому модулі помолу.

**Ключові слова:** зерно, ступінь подрібнення, енергозбереження, рівняння регресії.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Для подрібнення зернових компонентів при приготуванні комбікормів застосовується принцип руйнування який здійснюється переважно молотковими подрібнювачами, ударної дії. Значний вклад в розвиток теорії подрібнення зернових матеріалів внесли І.І. Ревенко, С.В. Мельников, Г.М. Кукта та ряд інших вчених. Але необхідна оптимізація факторів які суттєво впливають на якість роботи ударно-сепараційного подрібнювача.

**Постановка проблеми:** Для якісного приготування борошна, комбікормів, та виготовлення харчових продуктів важливу роль відіграє подрібнення вихідного матеріалу. Підвищення ефективності роботи і зниження енергоємності подрібнювального технологічного обладнання шляхом модернізації є важливим завданням його виробників і експлуатаційників, оскільки навіть мінімальне поліпшення цих показників може привести до відчутного економічного ефекту. На цьому шляху особливе значення має уточнення фізичного механізму руйнування фуражного зерна і формування на його підставі раціональних принципів робочого процесу з допоміжним залученням інших фізичних явищ.

**Мета дослідження.** Пошук оптимальних значень конструктивних і технологічних параметрів факторів які забезпечують мінімальні енерговитрати при подрібненні зерна ударно-сепараційним подрібнювачем.

**Результати дослідження.** У між факультетській лабораторії новітніх технологій в галузі харчових продуктів були проведені дослідження спрямовані на визначення оптимальних параметрів ударно-сепараційного подрібнювача при роботі яких будуть мінімальні витрати енергії при заданому ступеню подрібнення.

На основі аналізу дослідження роботи ударно-сепараційних подрібнювачів були обрані фактори, які впливають на показники роботи подрібнювачів. ( 1,2,3.) В якості факторів були обрані:  $X_1$  - кут нахилу відбивних пластин статора;  $X_2$  - лінійна швидкість (частота обертів) ротора;  $X_3$  - подача зерна;  $X_4$  - зазор між ротором та статором. Всі фактори належать і відповідають вимогам : вимірювальними наявними засобами; являються керованими і простійшими; сумісні один з

одним; не пов'язані між собою лінійними кореляційними зв'язками.

Для досліду впливу факторів на вихідні параметри складалася матриця планування експерименту, яка являє собою стандартну таблицю, де вказують умови проведення всіх дослідів, які створюють обраний план. В матриці планування рядки відповідають різним дослідом, а стовбці окремим факторам і їх взаємодіям. Складаючи матрицю експерименту, застосовували кодовані значення факторів. При кодуванні факторів здійснювали перетворення координат факторного простору, застосовуючи співвідношення:

$$X_i = \frac{C_i - C_{oi}}{e} \quad (1)$$

де  $X_i$  - кодоване значення фактора;

$C_i$  - натуральне значення фактора;

$C_{oi}$  - натуральне значення основного рівня;

$e$  - інтервал варіювання;

$i$  - номер фактора.

Для факторів які мають два рівня, один рівень 1, а другий -1. В матриці планування при варіюванні факторів на двох рівнях вказують тільки знаки (+ або -). При обранні області визначення факторів звертали увагу на обрання нульової точки (основного рівня фактора). На основі апріорної інформації були обрані наступні основні рівні факторів і інтервали їх варіювання:  $X_1$  -  $135 \pm 15^\circ$ ;  $X_2$  -  $50 \pm 15 \text{ м/с}$ ;  $X_3$  -  $8 \pm 2 \text{ кг/с} \cdot 10^{-3}$ ;  $X_4$  -  $6 \pm 3 \text{ мм}$ . Інтервал варіювання факторів обирався з урахуванням того, що значення факторів повинні достатньо відрізнятися від значення, відповідного нульовому рівню.

Досліди проводилися на розробленій експериментальній установці за допомогою електронних приладів вимірювались частота обертів ротора, сила та напруга струму. За допомогою секундоміра контролювали подачу зерна, Подрібнене зерно перемішували до однорідної суміші, та просіювали на лабораторному класифікаторі.

Аналітична обробка матеріалів експериментального дослідження проводилась для отримання математичної залежності вихідних параметрів від факторів, які брали участь в досліді. (4,5,6.) Обробка результатів експерименту проводилась в наступній послідовності. По ре-

зультатам паралельних спостережень визначалось середнє арифметичне значення результатів досліду.

$$\bar{Y} = \frac{\sum_{i=1}^n Y_i}{n} \quad (2)$$

де n- число паралельних спостережень;  
 $Y_i$  - результат окремого спостереження.

Дисперсія, яка характеризує варіацію повторних дослідів, визначалась за формулою:

$$S^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2}{n-1} \quad (3)$$

де n-1 - число ступенів свободи.

Таблиця 1. Результати дослідів подрібнення зерна.

| № п/п | $X_1$ | $X_2$ | $X_3$ | $X_4$ | $X_1$ – кут нахилу пластин статора, град | $X_2$ – лінійна швидкість ротора, м/с | $X_3$ – подача зерна, кг/с $10^{-3}$ | $X_4$ – зазор між статором ротором, мм | Використана потужність, кВт |               | Ступінь подрібнення зерна |
|-------|-------|-------|-------|-------|--|---------------------------------------|--------------------------------------|--|-----------------------------|---------------|---------------------------|
|       |       |       |       |       |  |                                       |                                      |  | Холостого ходу              | Робочого ходу |                           |
| 1.    | -     | -     | -     | -     | 120                                      | 35                                    | 6                                    | 3                                      | 0,63                        | 0,745         | 2,657043                  |
| 2.    | +     | -     | -     | -     | 150                                      | 35                                    | 6                                    | 3                                      | 0,585                       | 0,845         | 3,362749                  |
| 3.    | -     | +     | -     | -     | 120                                      | 65                                    | 6                                    | 3                                      | 1,815                       | 2,14          | 5,545695                  |
| 4.    | +     | +     | -     | -     | 150                                      | 65                                    | 6                                    | 3                                      | 1,62                        | 2,215         | 8,357099                  |
| 5.    | -     | -     | +     | -     | 120                                      | 35                                    | 10                                   | 3                                      | 0,595                       | 0,81          | 2,471171                  |
| 6.    | +     | -     | +     | -     | 150                                      | 35                                    | 10                                   | 3                                      | 0,59                        | 1,11          | 3,42957                   |
| 7.    | -     | +     | +     | -     | 120                                      | 65                                    | 10                                   | 3                                      | 1,745                       | 2,15          | 4,44426                   |
| 8.    | +     | +     | +     | -     | 150                                      | 65                                    | 10                                   | 3                                      | 1,62                        | 2,25          | 7,535347                  |
| 9.    | -     | -     | -     | +     | 120                                      | 35                                    | 6                                    | 9                                      | 0,59                        | 0,69          | 2,394451                  |
| 10.   | +     | -     | -     | +     | 150                                      | 35                                    | 6                                    | 9                                      | 0,58                        | 0,85          | 3,628746                  |
| 11.   | -     | +     | -     | +     | 120                                      | 65                                    | 6                                    | 9                                      | 1,715                       | 1,935         | 4,730012                  |
| 12.   | +     | +     | -     | +     | 150                                      | 65                                    | 6                                    | 9                                      | 1,78                        | 2,22          | 7,677892                  |
| 13.   | -     | -     | +     | +     | 120                                      | 35                                    | 10                                   | 9                                      | 0,59                        | 0,74          | 2,467084                  |
| 14.   | +     | -     | +     | +     | 150                                      | 35                                    | 10                                   | 9                                      | 0,59                        | 0,845         | 2,874675                  |
| 15.   | -     | +     | +     | +     | 120                                      | 65                                    | 10                                   | 9                                      | 1,805                       | 2,16          | 4,422108                  |
| 16.   | +     | +     | +     | +     | 150                                      | 65                                    | 10                                   | 9                                      | 1,785                       | 2,35          | 6,272705                  |

При проведенні паралельних дослідів для визначення помилкових дослідів використовувався критерій Стюдента:

$$\frac{Y_i - \bar{Y}}{S} \geq t \quad (4)$$

Якщо експериментальне значення критерію t – по модулю було більше табличного, то дослід рахувався не дійсним. Табличні значення t - обирались із таблиці t - розподілення Стюдента.

Перехід від помилок дослідів до помилки експерименту пов'язаний з усередненням дисперсії помилок, а це можливо тільки у випадку однорідності дисперсій. А це означає, що серед усіх підсумованих дисперсій нема таких, які б значно перевищували усі останні. Однорідність дисперсій перевірялась за допомогою критерію Кохрена, який дорівнює відношенню максимальної дисперсії до суми усіх дисперсій:

$$G = \frac{S_{\max}^2}{\sum_{i=1}^N S_i^2} \quad (5)$$

де N – кількість дисперсій у матриці планування.

Гіпотеза про однорідність дисперсій підтверджувалась, якщо експериментальне значення критерію Кохрена не перевищувала табличного значення. Однорідність дисперсій дослідів дозволяє переходити до оцінки дисперсії експерименту, котра обчислювалась за формулою.

$$S_y = \frac{\sum_{i=1}^N \sum_{u=1}^n (Y_{iu} - \bar{Y}_u)^2}{\sum_{i=1}^N (n-1)} \quad (6)$$

де N – число дослідів (число рядків матриці);  
n – число спостережень в окремому досліді;

$Y_{iu}$  – результат окремого спостереження;

$\bar{Y}_u$  – середнє арифметичне значення вихідного параметра у U – тому досліді.

Регресійний аналіз виконувався тільки після перевірки дисперсій на однорідність. Потім визначались значення коефіцієнтів регресії за методом найменших квадратів. Лінійні коефіцієнти регресії обчислювались за формулою:

$$b_i = \frac{\sum_{u=1}^N X_{iu} Y_u}{N} \quad (7)$$

де  $X_{iu}$  – значення фактора  $X_i$  в U – тому досліді;

$Y_u$  – значення вихідного параметра у тому ж досліді.

Вільний член рівняння регресії визначався як середнє арифметичне усіх значень вихідного параметра у матриці:

$$b_0 = \frac{\sum_{u=1}^N Y_u}{N} \quad (8)$$

Коефіцієнти регресії, які характеризують ефекти парного, потрійного і взаємодії факторів четвертого порядку, визначалися відповідно за формулами:

$$b_{ij} = \frac{\sum_{u=1}^N X_{iu} \cdot X_{ju} \cdot Y_u}{N} \quad (9)$$

$$b_{ijk} = \frac{\sum_{u=1}^N X_{iu} \cdot X_{ju} \cdot X_{ku} \cdot Y_u}{N} \quad (10)$$

$$b_{ijkl} = \frac{\sum_{u=1}^N X_{iu} \cdot X_{ju} \cdot X_{ku} \cdot X_{lu} \cdot Y_u}{N} \quad (11)$$

Визначення дисперсії  $S_y^2$ , яка характеризує похибку відтворювання, дає можливість оцінити значущість коефіцієнтів рівняння регресії. Оцінка значущості коефіцієнтів регресії пов'язана з побудовою довірчих інтервалів:

$$P(b_i - \Delta b_i \leq b_i \leq b_i + \Delta b_i) = \alpha \quad (12)$$

де  $\alpha$  – довірна вірогідність того, що знайдено

$$I = 4,517 + 0,875x_1 + 1,606x_2 - 0,277x_3 - 0,208x_4 + 0,462x_1x_2 - 0,177x_2 - 0,139x_2x_4 - 0,154x_1x_3x_4 \quad (14)$$

Найбільшвагомими факторами впливають наступні подрібнення зерна будуть - лінійна швидкість ротора та кута нахилу відбивних пластин статора, при збільшенні яких збільшується ступінь подрібнення. Збільшення подачі зерна та зазору

$$Wp = 1,492 + 0,071x_1 + 0,686x_2 + 0,037x_3 - 0,018x_4 + 0,022x_1x_4 + 0,016x_1x_2x_4 + 0,026x_2x_3x_1 \quad (15)$$

Аналіз цього рівняння показує, що самим вагомим фактором який збільшує витрати енергії є лінійна швидкість ротора, при збільшенні кута нахилу відбивних пластин статора та подачі зерна. Зменшення витрат енергії суттєво впливає при збільшенні зазору між ротором та статором. Рівняння витрат енергії при холостому подрібнювача має наступний вигляд.

$$Wp - Wx = 0,327 + 0,092x_1 + 0,115x_2 + 0,037x_3 - 0,033x_4 + 0,024x_1x_2 - 0,014x_2x_4 + 0,018x_2x_3x_4 \quad (17)$$

Як витрати на робочий хід так і витрати збільшуються при збільшенні лінійної швидкості ротора, кута нахилу відбивних пластин статора і подачі зерна та відповідно зменшуються при збільшенні зазору між ротором і статором.

**Висновки.** Аналіз результатів виконаного повно факторного експерименту показує, що всі обрані фактори впливають як на ступінь подрібнення зерна, так і на витрати енергії при подрібненні. Але значущість коефіцієнтів регресії, які характеризують ефекти парної і потрійної

розрахунком значення коефіцієнта  $b_i$  відрізняється від істинного значення коефіцієнта  $b_i$  на величину, котра не перевищує похибку  $\Delta b_i$  оцінки коефіцієнтів.

Довірчий інтервал обчислювався за формулою:

$$\Delta b_i = \pm \frac{t \cdot S_y}{\sqrt{N \cdot n}} \quad (13)$$

де  $t$  - табличне значення критерію Стьюдента при числі ступенів свободи, з яким визначалась  $S_y^2$ , при обраному рівні значущості 0,05.

Коефіцієнт рівняння регресії значущий, якщо його абсолютна величина більше довірчого інтервалу. Обробка результатів повно факторного експерименту дозволила отримати рівняння регресії, яке є моделлю об'єкта дослідження. Ступінь подрібнення зерна описується наступною математичною залежністю.

між ротором і статором навпаки зменшують ступінь подрібнення зерна. Залежність енергії при подрібненні зерна (робочий хід), має наступний вид.

$$Wx = 1,165 + 0,57x_2 \quad (16)$$

Вираз показує що зміна факторів, крім лінійної швидкості ротора, значуще не впливає на **Wx**. Також розглядалася різниця витрат енергії між робочим та холостим ходом, тобто умовно, та частина енергії яка витрачається безпосередньо на подрібнення зерна, ця залежність має наступний вигляд.

взаємодії показують, що лінійна модель недостатня для математичного опису дослідження з необхідною точністю, а тому виникає необхідність в побудові моделей у вигляді поліномів другого ступеня. У зв'язку з цим ми перейшли до планування і проведення експерименту, який пов'язаний з варіюванням факторів в трьох рівнях. Для цього матрицю повно факторного експерименту використовували як "ядро" рото табельного плану другого порядку з додавання до неї "зоряних" і нульових точок.

#### Список використаної літератури:

1. Ревенко І.І. та ін. Проектування механізованих технологічних процесів тваринницьких підприємств. К.: Урожай, 1999. – 191 с.
2. Кукта Г.М. Машины и оборудование для приготовления кормов. М.: Агропромиздат, 1987. – 303 с.

3. Механіко-технологічні властивості сільськогосподарських матеріалів. Підручник / О.М. Царенко, Д.Г. Войтюк та ін. За ред. Яцуна С.С. К.: Мета, 2003. – 448 с.
4. Адлер Ю.П. Планирование экспериментов при поиске оптимальных решений. / Ю.П.Адлер, Е.В. Макарова, Ю.В. Грановский. М.: Наука, 1986. – 215 с.
5. Тихомиров В.Б. Планирование и анализ эксперимента. М.: Легкая индустрия, 1974. – 262с.
6. Лавров В.В., Спиринов Н.А. Методы планирования и обработки результатов инженерного эксперимента. Екатеринбург, ГОУ ВПО УГТУ – УПИ, 2004. – 257 с.
7. Хохрин, С.Н. Корма и кормление животных [Текст] / С.Н. Хохрин. - М.:Лань, 2002. – 512с.
8. Вараксин, А.В. Исследование процесса измельчения концентрированных кормов [Текст]: авторефер. дис. канд. техн. наук / А.В. Вараксин. - Благовещенск, 2005. - 24 с.

**Сердюк В.В., Руденко В.А. ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ ЗЕРНА УДАРНО-СЕПАРАЦИОННЫМ ИЗМЕЛЬЧИТЕМ**

*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.*

**Ключевые слова:** зерно, степень измельчения, энергозбереження, уравнения регрессии.

**Serduk V.V., Rudenko V.A. STUDY OF GRINDING GRAIN SHOCK-SEPARATION GRINDERS**

*Between the faculty of laboratory of new technologies in the field of food studies have been conducted to determine the optimal values of the design parameters of the shock-separation grinder.*

*This was manufactured and installed shredder, which was in operation from the current motor rotation speed is changed by thyristor regulator. Energy costs were determined using the digital measuring instruments that were registered voltage and current, consumed by the engine. Evaluation of the quality of grinding determined the weighted average size of particles on the basis of scattering on пневматическому classifier sample product through a set of screens. Initial argument during experiments was adopted degree of crushing a material (and). The energy indicators grinding process(energy costs) were compared with the quality of the material grinding. At the first stage of the research was determined by the optimum tilt angle chops stator plates, and as an experienced feed material used a wheat grain. Conducted a series of experiments in which you changed technological factors, which are carried us to the first group, and the design parameters of the shredder - second group of factors.*

*As a result of the research of the dependence of the degree of grinding grain and energy on his grind, if you change the selected design and technological factors shredder.*

*Optimum values of part specification of percussive-separative grinder, have been received as a result of researches. Comparative tests have been conducted with production sample and their results have been given too.*

**Key words:** grain, degree of crushing, energy, the regression equation.

Стаття поступила в редакцію: 14.09.2013р.  
Рецензент: д.т.н., професор Якуба О.Р.