



DOI: 10.31388/2220-8674-2023-2-39

УДК 631.561.2

В. В. Сердюк	ORCID: 0000-0002-6257-8997
В. А. Руденко, к.т.н. доц.	ORCID: 0000-0001-7319-2451
О. О. Соларьов, к.т.н. доц.	ORCID: 0000-0002-1485-0685
О. А. Саржанов, к.т.н. доц.	ORCID: 0000-0003-3973-0185
А. В. Саєнко, ст. викл.	ORCID: 0000-0003-1272-5298

Сумський національний аграрний університет  
e-mail: 0978545199@ukr.net тел.: 099-489-20-17

## ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ ПРИ ПОДРІБНЕННІ ЗЕРНА

*Анотація.* В статті розглядаються та аналізуються результати проведених експериментальних досліджень подрібнення зерна у факультетській лабораторії новітніх технологій у галузі харчових продуктів. Досліди проводилися на ударно-сепараційному подрібнювачі за зміни конструктивних параметрів та режимів його роботи. Після кожного дослідження отримане подрібнене зерно перемішували до однорідної суміші та пересівали на лабораторному класифікаторі через набір сит. Середній модуль помелу визначали знаючи вагу кожної фракції. Енергія, що споживалася електричним двигуном, контролювалася вимірами сили струму і напруги електронними приладами. Перед проведенням подрібнення зерна визначалися параметри роботи подрібнювача на холостому ході. Прийнятими до експериментальних досліджень факторами були кут нахилу відбивних пластин статора, лінійна швидкість ротора (частота обертання), величина подачі зерна, зазор між ротором і статором. На першій стадії дослідів проведено повний факторний експеримент, проте він показав, що вихідні параметри процесу описати лінійною моделлю з необхідною точністю неможливо. План повного факторного експерименту добудували до плану другого порядку додаванням до "ядра" певної кількості "зоряних" і "нульових" точок і варіювання факторів в експериментальному дослідженні проводилося на трьох рівнях. Отриманий ротатабельний план з кодованими та іменованими значеннями факторів наведено у статті. Разом з визначенням енергоємності процесу подрібнення зерна, з урахуванням ступеня його подрібнення, розглядалися показники питомої витрати енергії при створенні одиниці нової поверхні вихідного матеріалу після подрібнення. Проведено аналіз впливу прийнятих до експериментальних досліджень факторів на питомі витрати енергії під



час подрібнення зерна. Побудовано графіки впливу окремих факторів на досліджувані параметри.

*Ключові слова:* витрата енергії, модуль помелу, зерно, подрібнення, планування експерименту, конструктивні параметри.

*Постановка проблеми.* Подрібнене зерно при згодовуванні його птахам та тваринам, за рахунок покращення процесу травлення і засвоювання поживних речовин, підвищує їх продуктивність на 10 ... 15% [1]. Однак, подрібнення зерна є енергоємною операцією в технології кормоприготування, і на його частку припадає близько 65% загальних витрат енергії. Собівартість готової продукції за енергетичними витратами становить близько до 33% [3], а у світі на подрібнення матеріалів припадає до 5% енергії, що виробляється [2]. Тому, з метою підвищення ефективності роботи ударно-сепараційного подрібнювача і зниження енерговитрат на його роботу, в сумарних витратах на виробництво продукції і проводилось дане дослідження.

*Аналіз останніх досліджень.* Дослідженнями зв'язку між витратами енергії та характеристиками подрібнюваного продукту займалися С.В. Мельников, І.І. Ревенко, В.П. Топячев, Г.М. Кукта, та ряд інших вчених. Подрібнення зерна відзначається енергоємністю і в залежності від виду комбікормів і технічного оснащення сільськогосподарського підприємства, витрати електроенергії на подрібнення складають 40 - 70% від загальних витрат на технологічні цілі [2]. У більшості останніх досліджень розглядаються питання енергетичної характеристики процесу дроблення з визначенням величини питомої витрати корисної енергії на одиницю маси зерна, що обробляється. Менше досліджень щодо визначення енергоємності процесу дроблення зерна, питомої витрати енергії на утворення одиниці нової поверхні при подрібненні зерна та впливу конструктивних параметрів подрібнювача й режимів його роботи на економічність процесу і якість дроблення.

*Формулювання мети статті.* Визначити вплив конструктивних параметрів ударно-сепараційного подрібнювача та режимів його роботи на енергоємність процесу дроблення та питому витрату енергії на утворення одиниці нової поверхні при подрібненні зерна.

*Основна частина.* Апріорний аналіз проведений по результатах виконаних дослідів роботи ударно-сепараційних подрібнювачів дозволив встановити конструктивні параметри та режими його роботи які значимо впливають на витрати енергії та суттєво відгукуються на ступені подрібнення зерна [1,2,3,4,5]. Такими факторами, як вже було зазначено [6,7,8], виявилися: кут нахилу відбивних пластин статора –  $X_1$ ; лінійна швидкість ротора (частота обертів) –  $X_2$ ; величина подачі зерна у подрібнювач –  $X_3$ ; величина зазору між ротором та статором –  $X_4$ .



Фактори, які приймають участь в експерименті, повинні відповідати певним вимогам, а саме: вони можуть змінюватися незалежно один від одного та визначатися і вимірюватися наявними засобами з необхідною точністю; мати сумісність один з одним; бути однозначними і керованими; не пов'язані між собою прямими кореляційними зв'язками та оцінюватися кількісно. Прийняті нами до експериментальних досліджень фактори відповідають вище наведеним вимогам. При виборі області досліджень особливу увагу звертали на визначенні основного рівня факторів (нульових точок). Також, на основі апріорної інформації вибиралися інтервали варіювання факторів в області експерименту, враховуючи те, що інтервали варіювання знаходяться в області симетричної щодо нульової точки та їх значення повинні бути достатньо віддалені від значення нульового рівня. Виходячи з цих вимог було визначено координати нульових точок та інтервали їх варіювання. В експериментальних дослідженнях вони склали: кут нахилу відбивних пластин статора  $X_1 - 135 \pm 15^\circ$ ; лінійна швидкість ротора (частота обертів)  $X_2 - 50 \pm 15 \text{ м/с}$ ; величина подачі зерна у подрібнювач  $X_3 - 80 \pm 20 \text{ кг/год}$ ; величина зазору між ротором та статором  $X_4 - 6 \pm 3 \text{ мм}$ .

Для проведення дослідження у між факультетській лабораторії новітніх технологій в галузі харчових продуктів СНАУ було розроблено і створено експериментальну установку. Необхідні в досліді кути нахилу відбивних пластин і зазори між статором та ротором утримувалися заміною статора виготовленого із заданими параметрами, щоб забезпечити встановлені матрицею планування експерименту умови. Лінійна швидкість ротора встановлювалася і контролювалася в досліді за допомогою електронного частотоміра. В одному досліді подрібнювалося зерно в кількості 500 грамів, що перевірялося контрольним зважуванням, яке проходило попередньо. Споживана електричним двигуном енергія контролювалася вимірами сили струму та напруги електронними приладами. Перед проведенням подрібнення зерна визначалися параметри роботи подрібнювача на холостому ході. Після кожного досліді отримане подрібнене зерно перемішували до однорідної суміші та пересівали на лабораторному класифікаторі через набір сит. Середній модуль помелу визначали знаючи вагу кожної фракції.

На першому етапі дослідження висувалася гіпотеза, що невідомі нам функції відгуку описувалися лінійною моделлю. Знання моделі дозволяє передбачати значення функцій відгуку у різних точках досліджуваного факторного простору. Щоб отримати лінійну модель, необхідно провести повний факторний експеримент або його дробову частину. Аналіз результатів проведеного повного факторного



експерименту показав [6,7,8], що обрані нами фактори впливають на параметри відгуку, витрати енергії та ступінь подрібнення зерна. Але отримана лінійна математична модель недостатньо точно описує параметри відгуку, так як коефіцієнти регресії які характеризують ефекти парної і потрійної взаємодії виявилися значущими.

При ротатабельному плануванні другого порядку добудовуємо план повного факторного експерименту, який є “ядром плану”, певної кількості “зіркових” та “нульових” точок (табл. 1).

Таблиця 1

Кодовані та іменовані значення факторів матриці планування експерименту.

№ п/п	Матриця планування				Робоча матриця				Складові ротатабельного плану
	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	X <sub>4</sub>	X <sub>1</sub> – кут нахилу пластин статора, град	X <sub>2</sub> – лінійна швидкість ротора, м/с	X <sub>3</sub> – подача зерна, кг/с · 10 <sup>-3</sup>	X <sub>4</sub> – зазор між ротором та статором, мм	
2	+	-	-	-	150	35	60	3	Ядро плану
3	-	+	-	-	120	65	60	3	
4	+	+	-	-	150	65	60	3	
5	-	-	+	-	120	35	100	3	
6	+	-	+	-	150	35	100	3	
7	-	+	+	-	120	65	100	3	
8	+	+	+	-	150	65	100	3	
9	-	-	-	+	120	35	60	9	
10	+	-	-	+	150	35	60	9	
11	-	+	-	+	120	65	60	9	
12	+	+	-	+	150	65	60	9	
13	-	-	+	+	120	35	100	9	
14	+	-	+	+	150	35	100	9	
15	-	+	+	+	120	65	100	9	



Продовження таблиці 1

16	+	+	+	+	150	65	100	9	Ядро плану
17	-2	0	0	0	105	50	80	6	Зіркові точки
18	+2	0	0	0	165	50	80	6	
19	0	-2	0	0	135	20	80	6	
20	0	+2	0	0	135	80	80	6	
21	0	0	-2	0	135	50	40	6	
22	0	0	+2	0	135	50	120	6	
23	0	0	0	-2	135	50	80	1	
24	0	0	0	+2	135	50	80	12	Нульові точки
25	0	0	0	0	135	50	80	6	
26	0	0	0	0	135	50	80	6	
27	0	0	0	0	135	50	80	6	
28	0	0	0	0	135	50	80	6	
29	0	0	0	0	135	50	80	6	
30	0	0	0	0	135	50	80	6	
31	0	0	0	0	135	50	80	6	

Проте значущість коефіцієнтів регресії, які характеризують ефекти парної і потрійної взаємодії показують, що лінійна модель недостатня для математичного опису дослідження з необхідною точністю, а тому виникла необхідність в побудові моделі у вигляді поліномів другого ступеня. А це вимагає переходу до планування, яке пов'язане із варіюванням факторів на трьох рівнях. Для продовження дослідження було обрано ротатабельний план, оскільки це сприяє тому, що рух від центру експерименту у всіх напрямках є рівнозначним. Ці плани ефективні під час вирішення завдань, що пов'язані з пошуком оптимуму.

Обробка результатів експериментальних досліджень проводилася за методами математичної статистики [9,10,11] і проводилася в наступній послідовності. Середнє арифметичне значення результатів дослідів визначалось за результатами паралельних спостережень. Для визначення помилкових дослідів розраховувалася дисперсія вимірів та використовувався критерій Стьюдента і якщо по модулю експериментальне значення цього критерію було більше табличного, то спостереження вважалось не дійсним.

Перехід від помилок окремих дослідів до помилки всього експерименту можливий з усередненням дисперсії помилок, а це дозволено тільки у випадку однорідності всіх дисперсій. В цьому випадку, серед усіх розглянутих дисперсій відсутні такі, які набагато перевищували усі останні. Перевірка здійснювалася за допомогою



критерію Кохрена.

Для наочності будемо умовно одомірні залежності енергоємності процесу подрібнення зерна з урахуванням ступеня подрібнення від досліджуваних факторів (рис.1,2,3,4).

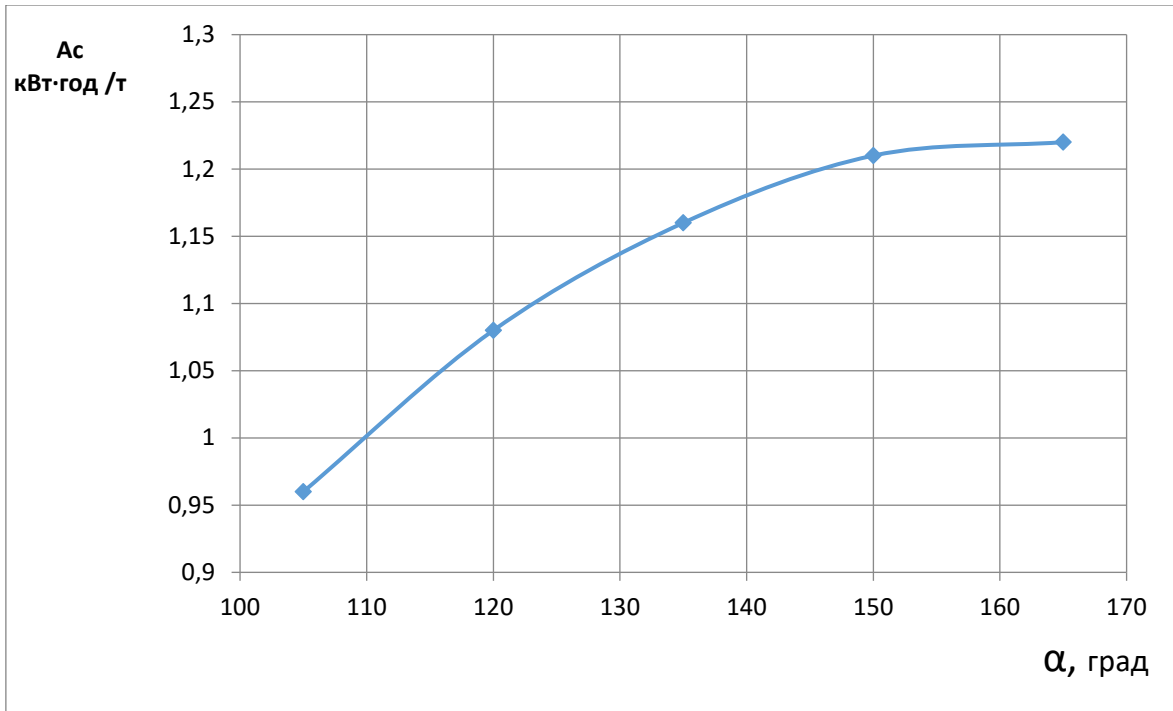


Рисунок 1. Залежність енергоємності процесу подрібнення зерна від кута нахилу відбивних пластин статора.

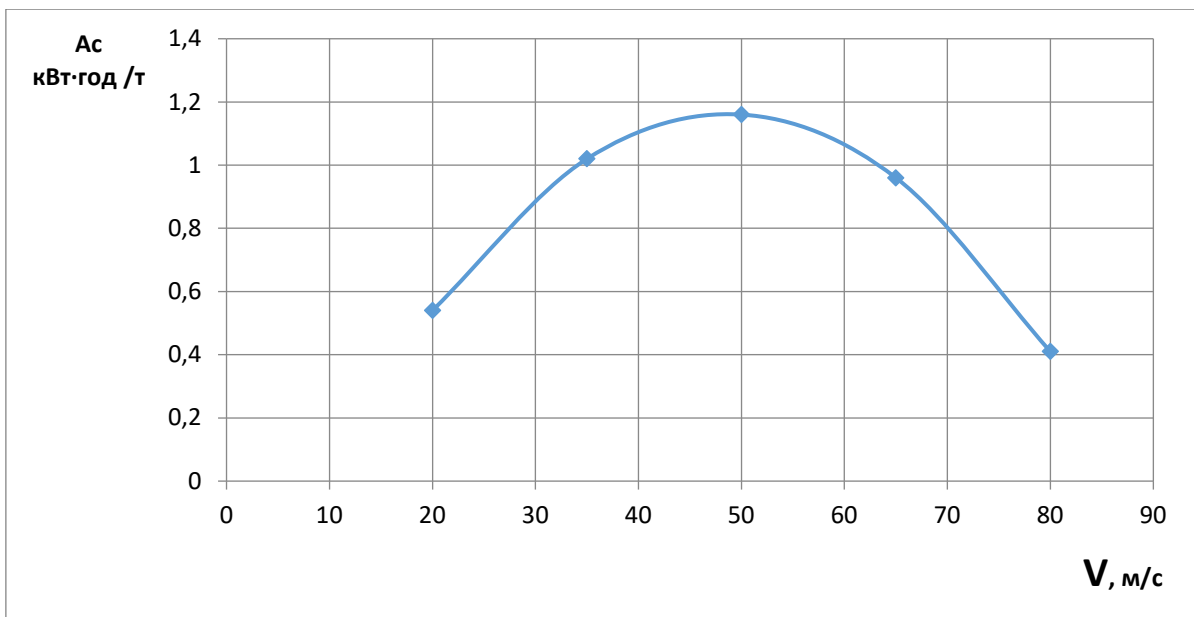


Рисунок 2. Залежність енергоємності процесу подрібнення зерна від лінійної швидкості ротора (частоти обертів).

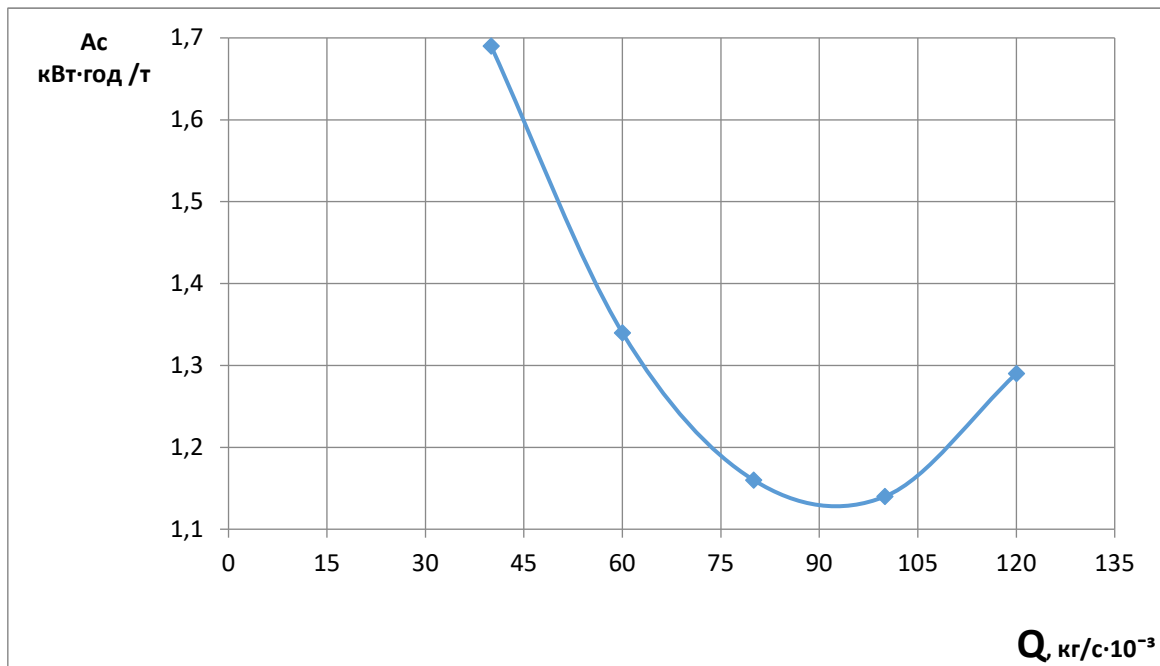


Рисунок 3. Залежність енергоємності процесу подрібнення зерна від подачі зерна.

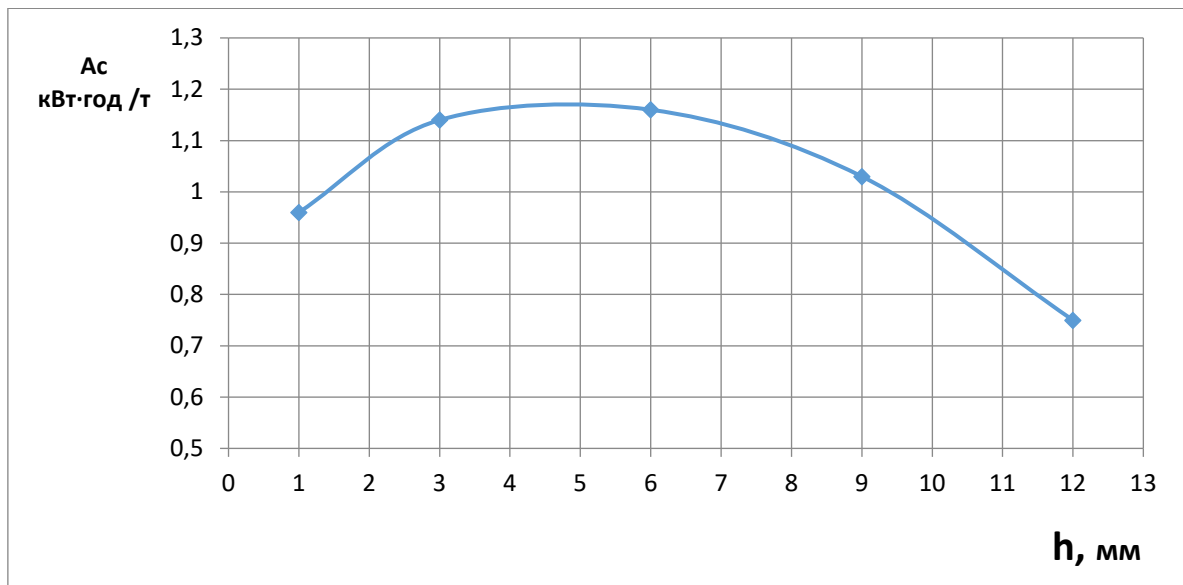


Рисунок 4. Залежність енергоємності процесу подрібнення зерна від зазору між ротором та статором.

Однорідність дисперсії проведеного дослідження дає можливість визначення величини дисперсії експерименту, тобто дисперсії відтворюваності, яка характеризує помилку експерименту. Знаючи її можна проводити регресійний аналіз.

Енергоємність процесу подрібнення зерна з урахуванням ступеня подрібнення визначалася за формулою:



$$A_c = \frac{W_p - W_x}{Q \cdot I},$$

де  $A_c$  - енергоємність процесу подрібнення зерна з урахуванням ступеня подрібнення, кВт-год / т

$W_p$  - використана потужність при подрібненні зерна (робочий хід), кВт;

$W_x$  - використана потужність при холостому ході, кВт;

$Q$  – подача зерна на подрібнення, кг/год;

$I$  - ступінь подрібнення зерна.

Отримані результати експериментальних досліджень оброблялися методами математичної статистики [8,9,10], знайдено значення коефіцієнтів рівняння регресії та отримано модель яка описує енергоємність процесу подрібнення зерна з урахуванням ступеня подрібнення.

$$A_c = 1,161 + 0,0643X_1 - 0,0314X_2 - 0,1003X_3 - 0,0533X_4 - 0,0678X_1X_2 - 0,0683X_1X_3 + 0,0182X_1X_4 - 0,017X_1^2 - 0,171X_2^2 + 0,083X_3^2 - 0,077X_4^2.$$

Разом з визначенням енергоємності процесу подрібнення зерна, з урахуванням ступеня подрібнення, розглядалися і показники питомої витрати енергії на створення одиниці нової поверхні від вихідного зерна під час подрібнення. Питомої витрати енергії на створення одиниці нової поверхні визначалися наступною залежністю:

$$A = \frac{W_p - W_x}{Q \cdot \Delta S},$$

де  $A$  - питомої витрати енергії на створення одиниці нової поверхні, Дж/м<sup>2</sup>;

$\Delta S$  - збільшення питомої площі поверхні, м<sup>2</sup>/кг.

Питомої витрати енергії на створення одиниці нової поверхні виражені наступним рівнянням регресії:

$$A = 4,413 - 0,593X_2 - 0,326X_3 - 0,137X_4 - 0,248X_1X_2 - 0,256X_1X_3 + 0,086X_1X_4 - 0,454X_2^2 + 0,317X_3^2 - 0,338X_4^2.$$

*Висновки.* Проведені експериментальні дослідження дозволили встановити, що конструктивні параметри ударно-сепараційного подрібнювача зерна та режими його роботи суттєво впливають на енергоємність процесу руйнування зерна та значення питомої витрати енергії на утворення одиниці нової поверхні. На основі дослідження одержаних математичних моделей встановлено вплив зміни досліджуваних параметрів на енергетичні показники, що дозволить вибирати найбільш оптимальні конструктивні параметри





подрібнювача та економні режими його роботи. Проведені дослідження на ударному подрібнювачі показали, що досягти заданої якості дроблення зерна можна варіюючи як конструктивні, так і технологічні фактори. При цьому, змінюючи рівні факторів, можна визначити і отримати бажаний результат з мінімальними витратами енергії.

#### Список використаних джерел

1. Дацишин О. В. Технологічне обладнання зернопереробних та олійних виробництв: науковий посібник. Вінниця: Нова книга. 2009. С. 488.
2. Ревенко І. І. Машини та обладнання для тваринництва: посібник практикум. Київ. Кондар. 2011. С. 396.
3. Єгоров Б. В. Технологія виробництва комбікормів. Одеса: Друкарський дім. 2011. С. 448.
4. Гвоздєв О. В. Вдосконалення процесу подрібнення зерна. *Збірник наукових праць. Серія «Технологічні науки»*. Вип. 9. Вінниця. 2011. С. 143–150.
5. Сердюк В. В. Руденко В. А. Дослідження процесу дроблення зерна ударно-сепараційним подрібнювачем. *Вісник СНАУ. Серія «Механізація та автоматизація виробничих процесів»*. Вип. 10(25). Суми. 2013. С. 117–121.
6. Сердюк В. В. Руденко В. А. Зубко В. М. Витрати енергії при роботі ударно-сепараційного подрібнювача. *Вісник СНАУ. Серія «Механізація та автоматизація виробничих процесів»*. Вип. 2(36). Суми. 2019. С. 28–32.
7. Ahmed Zeyad, Nadulski Rafał, Panasiewicz Marian. The influence of wheat hardness on energy consumption during the wheat milling. 2017. Pp. 17–20. 10.24326/fmpmsa.2017.3.
8. Dariusz Dziki, The crushing of wheat kernels and its consequence on the grinding process, *Powder Technology*, Volume 185, Issue 2, 2008, Pp. 181–186, ISSN 0032-5910, <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2007.10.012>.
9. Hourston J. E., Ignatz M., Reith M., Leubner-Metzger G., Steinbrecher T. Biomechanical properties of wheat grains: the implications on milling. *Journal of the Royal Society Interface*, 14(126), 2017. Pp. 1–12. doi:10.1098/rsif.2016.0828
10. Warechowska Małgorzata Some physical properties of cereal grain and energy consumption of grinding. *Agricultural Engineering* ISSN 1429-7264. 18 No.1(149). 2014. Pp. 239–249. 10.14654/ir.2014.149.025.

Стаття надійшла до редакції 21.04.2023 р.



V.V. Serdyuk, V. A. Rudenko, O. O. Solarev, O. A. Sarzhanov  
Sumy National Agrarian University

## ENERGY SAVING DURING GRAIN MILLING

### *Summary*

The article examines and analyzes the results of experimental studies of grain refinement at the faculty laboratory of new technologies in the kitchen of grub products. The studies were carried out on shock-separation detailing for changing the design parameters and modes of yoga work. After the skin analysis was finished, the grain was mixed to a uniform sum and transferred to a laboratory classifier through a set of sieves. The middle module of the pomelo was determined knowingly the value of the skin fraction. The energy, which was supplied by the electric motor, was controlled by measurements of current and voltage by electronic devices. Before carrying out the trimming of the grain, the parameters of the robotic trimming at idle were set. The factors taken up to the experimental results are the fracturing of the stator plates, the linear speed of the rotor (wrapping frequency), the amount of grain supply, the gap between the rotor and the stator. At the first stage, the final factorial experiment was carried out, showing that it is impossible to describe the final parameters of the process to describe the linear model with the necessary accuracy. The plan of the new factorial experiment was brought to the plan of a different order, adding to the "core" the number of "dawn" and "zero" points and the variation of factors in the experimental experiment was carried out on three levels. Removing the rotatable plan with coding and naming the values of the factors is indicated in the article. At the same time, with the importance of energy to the process of grain refinement, with the improvement of the step of its refinement, signs of the consumption of energy were seen when a single new surface of the outer material was created after the refinement. An analysis was carried out of the injection of factors taken up to the experimental results on the consumption of energy and grain refinement. The graphs were prompted to fill in the number of factors on the last parameters.

**Key words:** energy consumption, grinding module, grain, milling, experiment planning, design parameters.