

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ДНІПРОВСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ АГРАРНО-ЕКОНОМІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

БІЛОУС ІЛЛЯ МИХАЙЛОВИЧ

УДК 631.363.21–044.3 (043.5)

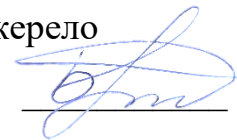
ДИСЕРТАЦІЯ

**Обґрунтування конструктивно-технологічних параметрів дискового
подрібнювача концентрованих кормів**

Галузь знань 13 – Механічна інженерія
133 – Галузеве машинобудування

Подається на здобуття освітньо-наукового ступеня доктора філософії

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело



Ілля БІЛОУС

Науковий керівник:

Дудін Володимир Юрійович,
кандидат технічних наук, доцент

Дніпро – 2025

АНОТАЦІЯ

Білоус І. М. Обґрунтування конструктивно-технологічних параметрів дискового подрібнювача концентрованих кормів. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття освітньо-наукового ступеня доктора філософії (PhD) за спеціальністю 133 Галузеве машинобудування (13 Механічна інженерія) – Дніпровський державний аграрно-економічний університет, Міністерство освіти і науки України, Дніпро, 2025.

Мета роботи – підвищення ефективності технологічного процесу подрібнення концентрованих кормів шляхом зниження питомих енерговитрат, поліпшення якості подрібненої продукції та обґрунтування раціональних конструктивно-технологічних параметрів дискового подрібнювача на основі встановлених емпіричних залежностей і розроблених фізико-математичних моделей чисельного моделювання.

Об'єкт дослідження – технологічний процес подрібнення концентрованих кормів дисковим подрібнювачем.

Предмет досліджень – залежності енергетичних витрат і показників ефективності подрібнення концентрованих кормів від конструктивно-технологічних параметрів дискового подрібнювача та умов протікання процесу, у відповідності з вимогами до якості подрібненого продукту.

Методи досліджень. Дослідження базувалися на застосуванні чисельного моделювання з використанням основних принципів класичної механіки, моделей дискретних елементів, багатофазної взаємодії та лагранжевої багатофазності. Чисельне моделювання проводилося у програмному середовищі Simcenter STAR-CCM+, що дозволило проаналізувати взаємодію компонентів концентрованих кормів із робочими органами подрібнювача та встановити закономірності їх руйнування. Експериментальні дослідження здійснювалися відповідно до методики математичного планування багатофакторного експерименту (план Бокса-Бенкена) з натурними випробуваннями дослідного зразка подрібнювача. Для обробки

результатів застосовувалися методи кореляційного, дисперсійного та регресійного аналізу з використанням програмного забезпечення Microsoft Excel і Wolfram Cloud.

Уперше одержано аналітичні та експериментальні залежності у вигляді рівнянь регресії другого порядку, які описують вплив конструктивно-технологічних параметрів (частоти обертання диска, модульного зазору між дисками, подачі сировини, кількості ударних накладок і кута їх встановлення) на показники питомої енергоемності, частки пилоподібної фракції у подрібненій масі та ступеня подрібнення зерна кукурудзи, пшениці та ячменю;

Отримали подальший розвиток фізико-математична модель руйнування зерна кукурудзи, пшениці та ячменю, заснована на методі дискретних елементів, моделі контактної взаємодії Герца–Міндліна та механізмі руйнування зв'язків, яка враховує фізико-механічні властивості зерна (модуль Юнга, коефіцієнт Пуассона та граничні напруги розтягу та зсуву).

Удосконалений дисковий подрібнювач для подрібнення концентрованих кормів впроваджено у виробничу діяльність ФГ «Моніка». Результати науково-технічної роботи у вигляді конструкторської та технічної документації на дослідний зразок подрібнювача були використані і впроваджені у виробництві ТОВ ВО «Восход» для виготовлення відповідного дослідного зразка. Встановлені аналітичні та експериментальні залежності щодо впливу конструктивно-технологічних параметрів подрібнювача на енергоспоживання і якість подрібнення використані при створенні науково-методичних рекомендацій з енергоефективного приготування концентрованих кормів. Отримані результати дослідження впроваджено в освітній процес Дніпровського державного аграрно-економічного університету – у компоненти освітньо-професійної програми «Агроінженерія» для підготовки здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти.

Відповідно до результатів патентно-інформаційного аналізу обґрунтовано конструктивно-технологічну схему дискового подрібнювача концентрованих кормів, що працює за принципом ударного різання. Подрібнювач складається з корпусу та співвісно розташованих у ньому верхнього і нижнього дисків з центральними й периферійними зонами. Обидва диски оснащені внутрішніми конусами з ударними

накладками, при цьому верхній диск має механізм регулювання осевого переміщення, що дає змогу встановлювати оптимальний розмір подрібнення.

Чисельне моделювання процесів руйнування зерна методом дискретних елементів у середовищі Simcenter STAR-CCM+ дало змогу встановити кількісні закономірності впливу фізико-механічних властивостей зернових культур (кукурудзи, пшениці, ячменя), просторової орієнтації зернини та конструктивно-технологічних параметрів подрібнювача на силу руйнування F при стиску та ударному різанні. Чисельне моделювання з використанням факторного планування дозволило уточнити матеріалознавчі параметри моделей зерна, зокрема модуль Юнга (E_p), коефіцієнт Пуассона (ν) та граничні напруги розтягу та зсуву (W_p), для кожної культури. Визначено раціональні значення відстані між ударними накладками $l = 1,59\text{--}1,99$ мм (або модульний зазор $\delta = 0,60\text{--}0,99$ мм), їхніх кутів встановлення $\beta = 21,8\text{--}25,3^\circ$ та швидкості руху $V = 4,72\text{--}5,86$ м/с (або частота обертання диска $n = 1503\text{--}1865$ об/хв), що враховують специфіку структури зерна та сприяють підвищенню ефективності й енергоощадності процесу подрібнення. Запропоновано інтегральний критерій оптимальності, який забезпечує баланс між мінімальною силою руйнування та максимальною продуктивністю, і підтверджено доцільність його застосування для адаптивного налаштування параметрів подрібнювача під конкретний вид сировини.

Проведені лабораторні дослідження показали, що геометричні параметри та маса зернин кукурудзи, пшениці і ячменя суттєво впливають на їх механічну міцність при стиску. Встановлено, що сила руйнування залежить від просторового положення зерна: максимальна міцність досягається в горизонтальному положенні для кукурудзи (363 ± 187 Н), пшениці (267 ± 44) й ячменя (270 ± 32 Н). Наведені результати є важливою базою для проведеного чисельного моделювання процесу подрібнення.

В результаті експериментальних досліджень базового дискового подрібнювача встановлені закономірності зміни питомої енергоємності подрібнення зерна кукурудзи, пшениці і ячменю q , частки пилоподібної фракції в подрібненій масі зерна a , ступеня подрібнення λ від подачі G , модульного зазору між дисками δ та частоти обертання диска n . Залежно від фізико-механічних властивостей зерна (кукурудзи,

пшениці, ячменя), визначено раціональні параметри ($G = 903\text{--}1057$ кг/год, $\delta = 0,71\text{--}0,73$ мм, $n = 1500\text{--}1642$ об/хв) і енерговитрати ($q = 3,85\text{--}7,07$ кВт·год/т), що дозволяє знизити частку пилоподібної фракції ($a = 2,11\text{--}9,98$ %), досягти потрібного ступеня подрібнення ($\lambda = 3,30\text{--}7,57$).

В результаті експериментальних досліджень удосконаленого дискового подрібнювача встановлені закономірності зміни питомої енергоємності подрібнення зерна кукурудзи, пшениці і ячменя q , частки пилоподібної фракції в подрібненій масі зерна a , ступеня подрібнення λ від кута встановлення ударних накладок β , кількості ударних накладок на одному диску z , частоти обертання робочого органу n . Спираючись на побудовані моделі було здійснено чисельну оптимізацію з метою визначення таких комбінацій факторів, за яких досягається мінімальне значення питомої енергоємності q та частки пилоподібної фракції у продукті подрібнення a при визначеному діапазоні ступеня подрібнення λ . Аналіз отриманих даних свідчить про досягнення оптимального поєднання технологічної ефективності та енергетичної доцільності при подрібненні кукурудзи, пшениці та ячменя. Частота обертання n ($1500\text{--}1764$ об/хв), кут встановлення ударних накладок β ($15,9\text{--}17,7^\circ$) та кількість ударних накладок z (9 шт.) були адаптовані під фізико-механічні властивості кожної культури. Найбільша енергоємність q спостерігались при обробці ячменя ($6,76$ кВт·год/т), найменша – для пшениці ($q = 3,63$ кВт·год/т). Частка пилоподібної фракції в подрібненій масі a була найбільшою для кукурудзи ($5,13$ %), а найменшою – для ячменя ($1,34$ %). Отримані результати підтверджують ефективність конструктивних рішень подрібнювача для адаптивної обробки різних зернових.

Порівняльний аналіз результатів дослідження конструктивно-технологічних параметрів дискового подрібнювача концентрованих кормів засвідчив ефективність удосконалень, спрямованих на підвищення технологічної якості подрібнення та зниження енерговитрат. Виявлені відхилення між базовим та удосконаленим варіантами пояснюються впровадженими конструктивними змінами — зокрема, використанням ударних накладок і оптимізацією режимів роботи. Це дозволило досягти зменшення питомої енергоємності на $4,38\text{--}13,72$ %, зниження частки пилоподібної фракції на $36,5\text{--}48,6$ % та забезпечення раціонального ступеня

подрібнення згідно рекомендацій (для кукурудзи в межах 7,2–9,4, а для пшениці і ячменя в межах 2–4). Інтеграція результатів експериментів і моделювання підтверджує доцільність індивідуального налаштування параметрів подрібнювача залежно від виду зернової сировини, що забезпечує збалансоване поєднання енергетичної ефективності та якості продукту.

Техніко-економічні розрахунки показали, що удосконалений дисковий подрібнювач кормів порівняно з базовим, при використанні на свинофермі (197 голів) із добовою потребою в концентрованих кормах 321,24 кг, дозволяє зменшити тривалість щоденної роботи обладнання з 2,80 до 1,97 години, що сприяє скороченню витрат праці на 42,2% та споживання електроенергії на 9,85%. Попри збільшення вартості удосконаленого подрібнювача, загальні операційні витрати і питомі витрати зменшилися на 36,45 %. Це забезпечило річний економічний ефект у розмірі 14370,56 грн і строк окупності інвестицій – 0,21 року.

Ключові слова: тваринництво, кормозабезпечення, харчова і переробна промисловість, годівля, приготування, корми, кормова суміш, переробка, комбікорми, концентровані корми, зоотехнічні вимоги, добовий раціон, сипкі компоненти, насіння, зерно, обладнання, конструкція, диск, дробарка, подрібнювач, експериментальна установка, дослідження, експеримент, лабораторні дослідження, моделювання, метод дискретних елементів, продуктивність, ефективність, параметри, частота обертання, кут нахилу, швидкість, тривалість процесу, енергоємність, подача, стискання, потужність, рівняння регресії, фізико-механічні властивості, статистичний аналіз, багатофакторний експеримент, функціональна залежність

ANNOTATION

Bilous I. M. Justification of the Design and Technological Parameters of a Disc Grinder for Concentrated Feed – Qualification research paper (manuscript form).

Dissertation for the degree of Doctor of Philosophy (PhD) in specialty 133 Industrial Engineering (field 13 Mechanical Engineering) – Dnipro State Agrarian and Economic University, Ministry of Education and Science of Ukraine, Dnipro, 2025.

The aim of the study is to improve the efficiency of the technological process of concentrated feed grinding by reducing specific energy consumption, enhancing the quality of the ground product, and justifying the optimal design and technological parameters of a disc grinder based on established empirical dependencies and developed physical and mathematical models of numerical simulation.

The object of the study is the technological process of grinding concentrated feed using a disc grinder.

The subject of the study is the dependencies of energy consumption and grinding efficiency indicators of concentrated feed on the design and technological parameters of the disc grinder and the process conditions, in accordance with the requirements for the quality of the ground product.

Research methods. The research was based on the application of numerical simulation using the fundamental principles of classical mechanics, discrete element method models, multiphase interaction, and Lagrangian multiphase modeling. Numerical modeling was performed in the Simcenter STAR-CCM+ software environment, which enabled analysis of the interaction between concentrated feed components and the working parts of the grinder and identification of the patterns of their destruction. Experimental studies were carried out following the methodology of mathematical planning of a multifactor experiment (Box–Behnken design) with field tests of a prototype grinder. Data processing involved methods of correlation, analysis of variance (ANOVA), and regression analysis using Microsoft Excel and Wolfram Cloud software.

For the first time, analytical and experimental dependencies were obtained in the form of second-order regression equations describing the influence of design and technological

parameters (disc rotational speed, modular gap between discs, feed rate, number of impact overlays, and their installation angle) on the specific energy consumption, the proportion of dust-like fraction in the ground mass, and the degree of grinding of corn, wheat, and barley grain.

The physical and mathematical model of corn, wheat, and barley grain destruction—based on the discrete element method, Hertz-Mindlin contact interaction model, and the bond-breaking mechanism – was further developed, taking into account the physical and mechanical properties of the grain (Young's modulus, Poisson's ratio, and ultimate stress).

An improved disc grinder for concentrated feed grinding was implemented in the production operations of the farming enterprise "Monika". The results of the scientific and technical work, in the form of design and technical documentation for the grinder prototype, were used and introduced in the production by the company LLC VO "Voskhod" for manufacturing the corresponding prototype. The established analytical and experimental dependencies regarding the influence of the grinder's design and technological parameters on energy consumption and grinding quality were applied in the development of scientific and methodological recommendations for energy-efficient preparation of concentrated feed. The research findings were also integrated into the educational process at Dnipro State Agrarian and Economic University – within the educational and professional program Agroengineering for training students of the first (bachelor's) level of higher education.

Based on the results of the patent and information analysis, the design and technological layout of a disc grinder for concentrated feed, operating on the principle of impact cutting, was substantiated. The grinder consists of a housing and coaxially arranged upper and lower discs with central and peripheral zones. Both discs are equipped with internal cones and impact overlays, with the upper disc featuring an axial displacement adjustment mechanism that allows the optimal grinding size to be set.

Numerical modeling of grain destruction processes using the discrete element method in the Simcenter STAR-CCM+ environment made it possible to establish quantitative patterns of the influence of the physical and mechanical properties of grain crops (corn, wheat, barley), the spatial orientation of the grain, and the design and technological parameters of the grinder on the destruction force F during compression and impact cutting.

Numerical modeling with the use of factorial design enabled refinement of the material parameters of grain models, in particular Young's modulus (E_p), Poisson's ratio (ν), and ultimate stress (W_p) for each crop. Rational values were determined for the distance between the impact overlays $l = 1.59\text{--}1.99$ mm (or modular gap $\delta = 0.60\text{--}0.99$ mm), their installation angles $\beta = 21.8\text{--}25.3^\circ$, and movement velocity $V = 4.72\text{--}5.86$ m/s (or disc rotational speed $n = 1503\text{--}1865$ rpm), which take into account the specific structure of the grain and contribute to improving the efficiency and energy saving of the grinding process. An integral optimality criterion was proposed to ensure a balance between minimal destruction force and maximum productivity, and the feasibility of its use for adaptive adjustment of grinder parameters to specific raw material types was confirmed.

Laboratory studies showed that the geometric parameters and mass of corn, wheat, and barley grains significantly affect their mechanical strength under compression. It was established that the destruction force depends on the spatial orientation of the grain: maximum strength is observed in the horizontal position for corn (363 ± 187 N), wheat (267 ± 44 N) and barley (270 ± 32 N). These results provide an important foundation for the conducted numerical modeling of the grinding process.

As a result of experimental studies on the basic disc grinder, the dependencies of specific energy consumption for grinding corn, wheat, and barley grain (q), the proportion of the dust-like fraction in the ground mass (a), and the degree of grinding (λ) on the feed rate (G), modular gap between the discs (δ), and disc rotational speed (n) were established. Depending on the physical and mechanical properties of the grain (corn, wheat, barley), the optimal grinding parameters were determined: feed rate $G = 903\text{--}1057$ kg/h, modular gap $\delta = 0.71\text{--}0.73$ mm, disc speed $n = 1500\text{--}1642$ rpm, and energy consumption $q = 3.85\text{--}7.07$ kWh/t, which allows reducing the dust-like fraction ($a = 2.11\text{--}9.98\%$) and achieving the required degree of grinding ($\lambda = 3.30\text{--}7.57$).

As a result of experimental studies of the improved disc grinder, patterns were established for the variation of the specific energy consumption of grinding corn, wheat, and barley grain (q), the proportion of the dust-like fraction in the ground mass (a), and the degree of grinding (λ) depending on the installation angle of the impact overlays (β), the number of impact overlays on one disc (z), and the rotational speed of the working element

(n). Based on the developed models, numerical optimization was performed to determine the combinations of factors that yield the minimum values of specific energy consumption (q) and dust-like fraction in the ground product (a) within a defined range of grinding degree (λ).

The analysis of the obtained data indicates the achievement of an optimal combination of technological efficiency and energy feasibility during the grinding of corn, wheat, and barley. The rotational speed n (1500–1764 rpm), the installation angle of impact overlays β (15.9–17.7°), and the number of impact overlays z (9 pcs.) were adapted to the physical and mechanical properties of each crop. The highest energy consumption q was observed during barley processing (6.76 kWh/t), while the lowest was for wheat ($q = 3.63$ kWh/t). The share of the dust-like fraction a was the highest for corn (5.13%) and the lowest for wheat (1.71%). These results confirm the effectiveness of the grinder's design solutions for adaptive processing of different grains.

A comparative analysis of the research results regarding the design and technological parameters of the disc grinder for concentrated feed confirmed the effectiveness of the improvements aimed at enhancing grinding quality and reducing energy consumption. The observed deviations between the basic and improved versions are explained by the implemented structural changes – particularly, the use of impact overlays and optimization of operating modes. This led to a reduction in specific energy consumption by 4.4–13.7%, a decrease in the proportion of the dust-like fraction by 36.5–48.6%, and the achievement of a rational grinding degree in accordance with the recommendations (for corn in the range of 7.2–9.4, and for wheat and barley in the range of 2–4). The integration of experimental and modeling results confirms the feasibility of individually adjusting the grinder parameters depending on the type of grain raw material, ensuring a balanced combination of energy efficiency and product quality.

The techno-economic calculations have shown that the improved disc feed grinder, compared to the basic model, when used on a pig farm (197 heads) with a daily demand for concentrated feed of 321.24 kg, allows the duration of daily equipment operation to be reduced from 2.80 to 1.97 hours, which contributes to a 42.2% reduction in labor costs and a 9.85% decrease in electricity consumption. Despite the increase in the cost of the improved

shredder, total operating costs and unit costs decreased by 36.45%. This resulted in an annual economic effect of UAH 14370.56 and a payback period of 0.21 years.

Keywords: animal husbandry, feed supply, food and processing industry, feeding, preparation, feed, feed mixture, processing, compound feed, concentrated feed, zootechnical requirements, daily ration, bulk components, seeds, grain, equipment, design, disc, crusher, grinder, experimental setup, research, experiment, laboratory studies, modeling, discrete element method, productivity, efficiency, parameters, rotational speed, tilt angle, velocity, process duration, energy consumption, feed rate, compression, power, regression equation, physical and mechanical properties, statistical analysis, multifactor experiment, functional dependence.

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА, В ЯКИХ ОПУБЛІКОВАНІ ОСНОВНІ НАУКОВІ РЕЗУЛЬТАТИ ДИСЕРТАЦІЇ

Статті у наукових виданнях, включених до переліку наукових фахових видань України зі спеціальності 133 Галузеве машинобудування:

1. Дудін, В. Ю., & Білоус, І. М. (2023). Експериментальні дослідження дискового подрібнювача зерна. *Техніка, енергетика, транспорт АПК*, 4(123), 71–77. <http://dx.doi.org/10.37128/2520-6168-2023-4-8> (Здобувачу належить проведення експериментальних досліджень і статистична обробка отриманих даних)

2. Дудін, В. Ю., & Білоус, І. М. (2024). Дослідження процесу руйнування зерна кукурудзи з використанням цифрових моделей. *Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки*, 10(41), II, 123–130. [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2024.10\(41\).2.123-130](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2024.10(41).2.123-130) (Здобувачу належить проведення чисельного моделювання і статистична обробка отриманих даних)

3. Дудін, В. & Білоус, І. (2025). Дослідження ефективності роботи дискового подрібнювача зерна. *Вібрації в техніці та технологіях*, 1(116), 56–63. <https://doi.org/10.37128/2306-8744-2025-1-7> (Здобувачу належить проведення лабораторних досліджень і статистична обробка отриманих даних)

Заявка на патент України на корисну модель:

4. Дудін, В. & Білоус, І. (2025). Заявка на патент України на корисну модель u202501193. Подрібнювач концентрованих кормів. Заявник: Дудін В., Білоус І., Заявл. 20.03.2025. <https://sis.nipo.gov.ua/uk/search/detail/1847229/> (Здобувачу належить розробка конструктивної схеми і опис установки)

Тези і матеріали конференцій:

5. Білоус, І. М. (2022). Обґрунтування доцільності підвищення ефективності подрібнення концентрованих кормів. *Матеріали XXI Міжнародної науково-технічної конференції «Технічний прогрес у тваринництві та кормовиробництві»* (с. 9–11). ІМА АПВ НААН України. <https://imaap.org.ua/info/attach.php?id=817>

6. Дудін, В. Ю., & Білоус, І. М. (2023). Стенд для проведення експериментальних досліджень дискового подрібнювача зерна. *Матеріали VI Всеукраїнської науково-практичної інтернет-конференції «Проблеми та перспективи розвитку сільськогосподарського машинобудування»* (с. 54–56). ПДАУ. <https://surl.li/wlmlrk> (Здобувачу належить розробка стенду для проведення експериментальних досліджень)

7. Дудін, В. Ю., & Білоус, І. М. (2024). Дослідження міцності зерна кукурудзи з використанням чисельного моделювання методом дискретних елементів (DEM). *Збірник тез доповідей XXV Міжнародної наукової конференції «Сучасні проблеми землеробської механіки»* (с. 191–193). МОН України; НУБіП України. https://nubip.edu.ua/sites/default/files/u349/zbirnik_tez_1.pdf (Здобувачу належить проведення чисельного моделювання і статистична обробка отриманих даних)

8. Дудін, В. Ю., & Білоус, І. М. (2024). Лабораторне обладнання для дослідження процесу визначення зусилля руйнування та деформації зерна. *Збірник тез III Всеукраїнської науково-практичної конференції молодих вчених «Інжиніринг технологій і технічних систем агропромислового комплексу»* (с. 170–172). ДДАЕУ. [https://133phd.dsau.dp.ua/images/doc/conference/2024/Theses_DDAEU\(2024\)_1.pdf](https://133phd.dsau.dp.ua/images/doc/conference/2024/Theses_DDAEU(2024)_1.pdf) (Здобувачу належить розробка лабораторного обладнання для проведення експериментальних досліджень)

9. Білоус, І. М. (2025). Класифікація дискових подрібнювачів. *Збірник тез доповідей Міжнародної науково-практичної конференції «Інновації в агропромисловому комплексі, машинобудуванні та транспорті»* (9–10 квітня 2025 р., Рівне) (с. 8–10). НУВГП. https://drive.google.com/file/d/1yaVhIX2CoJY-hMAXFp3XmDAR4yxPZs_f/view?usp=sharing

ЗМІСТ

ВСТУП	16
1 СУЧАСНИЙ СТАН ПРОБЛЕМИ І ВИБІР НАПРЯМІВ ДОСЛІДЖЕНЬ	21
1.1 Виробництво комбікормів в Україні та світі	21
1.2 Технологія приготування комбікормів	28
1.3 Вплив якості комбікормів на ефективність тваринництва	34
1.4 Аналіз способів та обладнання для подрібнення зернових кормів	40
1.5 Аналіз дискових подрібнювачів	45
1.6 Аналіз наукових досліджень	48
1.7 Обґрунтування конструктивно-технологічної схеми дискового подрібнювача	54
1.8 Висновки до розділу	57
2 ЧИСЕЛЬНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ПОДРІБНЕННЯ КОМПОНЕНТІВ КОНЦЕНТРОВАНИХ КОРМІВ	60
2.1 Постановка задачі моделювання	60
2.2 Фізико-математичний апарат симуляції процесу руйнування зерна	62
2.3 Симуляція процесу руйнування зерна стиском	68
2.4 Симуляція процесу руйнування зерна ударним різанням	81
2.5 Висновки до розділу	95
3 МЕТОДИКА ПРОВЕДЕННЯ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ПРОЦЕСУ ПОДРІБНЕННЯ КОМПОНЕНТІВ КОНЦЕНТРОВАНИХ КОРМІВ	97
3.1 Мета, задачі і програма експериментальних досліджень	97
3.2 Методика лабораторних досліджень руйнування зерна при стиску	97
3.3 Стенд для проведення експериментальних досліджень	103
3.4 Методика експериментальних досліджень базового дискового подрібнювача	113
3.5 Методика експериментальних досліджень удосконаленого дискового подрібнювача	123
3.6 Методика статистичної обробки експериментальних даних	125

4 РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ПРОЦЕСУ ПОДРІБНЕННЯ КОМПОНЕНТІВ КОНЦЕНТРОВАНИХ КОРМІВ.....	127
4.1 Результати лабораторних досліджень руйнування зерна при стиску	127
4.2 Результати експериментальних досліджень базового дискового подрібнювача	137
4.3 Результати експериментальних досліджень удосконаленого дискового подрібнювача	149
4.4 Порівняння результатів досліджень процесу подрібнення компонентів концентрованих кормів	163
4.5 Висновки до розділу	166
5 ВПРОВАДЖЕННЯ І ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНА ОЦІНКА РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕННЯ.....	169
5.1 Впровадження результатів дослідження.....	169
5.2 Техніко-економічна ефективність застосування удосконаленого дискового подрібнювача	172
5.3 Висновки до розділу	173
ВИСНОВКИ.....	175
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	178
Додаток А. Патентний пошук	201
Додаток Б. Стан діловодства патенту	212
Додаток В. Результати симуляції процесу руйнування зерна стиском	214
Додаток Г. Результати симуляції процесу руйнування зерна ударним різанням	218
Додаток Д. Результати експериментальних досліджень базового дискового подрібнювача.....	225
Додаток Е. Результати експериментальних досліджень удосконаленого дискового подрібнювача	234
Додаток Ж. Акти впровадження	242
Додаток И. Результати економічного розрахунку застосування удосконаленого дискового подрібнювача	245
Додаток К. Список публікацій здобувача.....	246

ВСТУП

Актуальність теми. У сучасних умовах розвитку агропромислового комплексу України, особливо в контексті зростання вимог до якості кормів, мінімізації витрат на виробництво та адаптації до нестабільної економічної й енергетичної ситуації, особливого значення набуває вдосконалення обладнання для механічної обробки зернової сировини. Процес подрібнення є обов'язковим і енергоємним етапом технологічної лінії приготування комбікормів. Тому виникає потреба в підвищенні його ефективності та енергоощадності.

Дискові подрібнювачі концентрованих кормів мають низку переваг порівняно з молотковими, зокрема забезпечують більш рівномірний фракційний склад подрібненої маси, менший рівень шуму й вібрацій, а також потенційно нижче енергоспоживання. Водночас ефективність їхньої роботи значною мірою залежить від раціонального вибору конструктивних і технологічних параметрів, таких як зазор між дисками, форма поверхні робочого органу, частота обертання тощо.

Проте вітчизняна та зарубіжна науково-технічна база з дослідження подібних подрібнювачів є обмеженою, а більшість наявних рішень не враховують комплексної оптимізації процесу з урахуванням впливу конструктивних параметрів на якість подрібненої маси та енергоспоживання. Це зумовлює необхідність проведення цілеспрямованого наукового дослідження, результати якого дадуть змогу вдосконалити існуючі конструкції дискових подрібнювачів і підвищити ефективність комбікормового виробництва.

Таким чином, обґрунтування конструктивно-технологічних параметрів дискового подрібнювача концентрованих кормів є актуальним завданням, що відповідає сучасним потребам сільськогосподарського виробництва, сприяє впровадженню енергоощадних технологій і підвищенню якості кормів для тваринництва.

Зв'язок роботи з науковими програмами. Дослідження, що лягли в основу дисертаційної роботи, були виконані у Дніпровському державному аграрно-економічному університеті (ДДАЕУ) в межах реалізації науково-дослідних програм:

«Розроблення та удосконалення механотронних систем виробничих процесів у тваринництві» (№ ДР 0121U109891, 2021–2025 рр.) та «Інтенсифікація техніко-технологічного забезпечення процесів переробки насіння малопоширених (нішевих) олійних культур» (№ ДР 0125U000488, 2025 р.).

Мета дослідження – підвищення ефективності технологічного процесу подрібнення концентрованих кормів шляхом зниження питомих енерговитрат, поліпшення якості подрібненої продукції та обґрунтування раціональних конструктивно-технологічних параметрів дискового подрібнювача на основі встановлених емпіричних залежностей і розроблених фізико-математичних моделей чисельного моделювання.

Для досягнення поставленої мети сформульовано **наукову гіпотезу**, згідно з якою раціональний добір конструктивно-технологічних параметрів дискового подрібнювача концентрованих кормів, що працює за принципом ударного різання, на основі емпіричних залежностей і фізико-математичного моделювання забезпечує оптимальний баланс між якістю подрібненої продукції та питомими енерговитратами, що, у свою чергу, підвищує загальну ефективність процесу подрібнення і знижує витрати у виробництві комбікормів.

Задачі дослідження:

- провести патентно-інформаційний аналіз процесу подрібнення концентрованих кормів та обґрунтувати раціональну конструктивно-технологічну схему дискового подрібнювача;

- провести чисельне моделювання процесу подрібнення концентрованих кормів та встановити вплив фізико-механічних властивостей зерна, його орієнтації та параметрів дискового подрібнювача на силу руйнування при стиску та ударному різанні;

- провести лабораторні дослідження та визначити вплив геометричних параметрів і маси зерна кукурудзи, пшениці та ячменя на їхню механічну міцність при стиску з урахуванням просторового положення зерна, з метою використання отриманих результатів для подальшого чисельного моделювання процесу подрібнення;

– створити експериментальний стенд, розробити методику та провести дослідження базового й удосконаленого дискового подрібнювача концентрованих кормів з метою визначення раціональних конструктивно-технологічних параметрів і емпіричних залежностей процесу його роботи;

– впровадити результати досліджень у виробництво та здійснити техніко-економічну оцінку ефективності застосування удосконаленого дискового подрібнювача концентрованих кормів.

Об'єкт дослідження: технологічний процес подрібнення концентрованих кормів дисковим подрібнювачем.

Предмет дослідження: залежності енергетичних витрат і показників ефективності подрібнення концентрованих кормів від конструктивно-технологічних параметрів дискового подрібнювача та умов протікання процесу, у відповідності з вимогами до якості подрібненого продукту.

Методи дослідження. Дослідження базувалися на застосуванні чисельного моделювання з використанням основних принципів класичної механіки, моделей дискретних елементів, багатофазної взаємодії та лагранжевої багатофазності. Чисельне моделювання проводилося у програмному середовищі Simcenter STAR-CCM+, що дозволило проаналізувати взаємодію компонентів концентрованих кормів із робочими органами подрібнювача та встановити закономірності їх руйнування. Експериментальні дослідження здійснювалися відповідно до методики математичного планування багатофакторного експерименту (план Бокса-Бенкена) з натурними випробуваннями дослідного зразка подрібнювача. Для обробки результатів застосовувалися методи кореляційного, дисперсійного та регресійного аналізу з використанням програмного забезпечення Microsoft Excel і Wolfram Cloud.

Наукова новизна одержаних результатів. *Уперше:*

– одержано аналітичні та експериментальні залежності у вигляді рівнянь регресії другого порядку, які описують вплив конструктивно-технологічних параметрів (частоти обертання диска, модульного зазору між дисками, подачі сировини, кількості ударних накладок і кута їх встановлення) на показники питомої

енергоємності, частки пилоподібної фракції у подрібненій масі та ступеня подрібнення зерна кукурудзи, пшениці та ячменю.

Отримали подальший розвиток:

– фізико-математична модель руйнування зерна кукурудзи, пшениці та ячменю, заснована на методі дискретних елементів, моделі контактної взаємодії Герца–Міндліна та механізмі руйнування зв'язків, яка враховує фізико-механічні властивості зерна (модуль Юнга, коефіцієнт Пуассона та граничні напруги розтягу та зсуву).

Практичне значення одержаних результатів. Удосконалений дисковий подрібнювач для подрібнення концентрованих кормів впроваджено у виробничу діяльність ФГ «Моніка». Результати науково-технічної роботи у вигляді конструкторської та технічної документації на дослідний зразок подрібнювача були використані і впроваджені у виробництві ТОВ ВО «Восход» для виготовлення відповідного дослідного зразка. Встановлені аналітичні та експериментальні залежності щодо впливу конструктивно-технологічних параметрів подрібнювача на енергоспоживання і якість подрібнення використані при створенні науково-методичних рекомендацій з енергоефективного приготування концентрованих кормів. Отримані результати дослідження впроваджено в освітній процес Дніпровського державного аграрно-економічного університету – у компоненти освітньо-професійної програми «Агроінженерія» для підготовки здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти.

Особистий внесок здобувача. Теоретичні та експериментальні результати досліджень, що виносяться на захист, отримані автором самостійно. Постановка задач, аналіз та інтерпретація результатів проведені у співпраці з науковим керівником. У наукових роботах, опублікованих у співавторстві, здобувачу належать: [154, 155, 172, 173] – аналіз сучасного стану техніко-технологічного забезпечення процесів подрібнення концентрованих кормів, класифікація і порівняльна оцінка конструкцій існуючих подрібнювачів, виявлення їх переваг і недоліків; [176, 175] – побудова фізико-математичної моделі та чисельне моделювання процесу подрібнення концентрованих кормів із використанням методу дискретних елементів

у середовищі Simcenter STAR-CCM+; [176, 177] – розробка та адаптація лабораторного обладнання для дослідження процесу руйнування та деформації зерна, а також проведення натурних експериментів із вимірювання зусиль подрібнення; [172, 173, 174, 171] – розробка та адаптація експериментального обладнання і проведення експериментальних досліджень, обробка та аналіз даних, побудова регресійних моделей і визначення раціональних поєднань конструктивно-технологічних параметрів дискового подрібнювача для досягнення високої якості подрібнення при мінімізації енергоспоживання.

Апробація результатів дисертації. Основні результати дисертації доповідались та отримали позитивну оцінку на: XI-й Міжнародній науково-технічній конференції «Технічний прогрес у тваринництві та кормовиробництві» (Україна, смт Глеваха Київської області – м. Київ, ІМААПВ НААНЗ та НУБіП, 3-22 жовтня 2022 р.); VI-й Всеукраїнській науково-практичній інтернет-конференції «Проблеми та перспективи розвитку сільськогосподарського машинобудування» (Україна, м. Полтава, ПДАУ, 21-22 грудня 2023 р.); XXV-й Міжнародній науковій конференції «Сучасні проблеми землеробської механіки» » (Україна, м. Київ, НУБіП України, 17-19 жовтня 2024 р.); III-й Всеукраїнській науково-практичній конференції молодих вчених «Інжиніринг технологій і технічних систем агропромислового комплексу» (Україна, м. Дніпро, ДДАЕУ, 15 листопада 2024 р.); Міжнародній науково-практичній конференції «Інновації в агропромисловому комплексі, машинобудуванні та транспорті» (Україна, м. Рівне, НУВГП, 9-10 квітня 2025 р.).

Публікації. Основні результати дисертаційного дослідження оприлюднені в 9 наукових публікаціях, серед яких: 3 статті у фахових наукових журналах України (категорія Б); 1 заявка на патент України на корисну модель; 5 матеріалів та тез у збірниках конференцій та інших наукових виданнях.

Структура та обсяг дисертації. Дисертація складається з вступу, 5 розділів, висновків, списку використаних джерел і додатків. Повний обсяг дисертації складає 247 сторінок, у тому числі 9 додатків на 47 сторінках. Обсяг основного тексту дисертації становить 200 сторінок, містить 63 рисунки, 37 таблиць. Список використаних джерел нараховує 201 найменування на 23 сторінках.

1 СУЧАСНИЙ СТАН ПРОБЛЕМИ І ВИБІР НАПРЯМІВ ДОСЛІДЖЕНЬ

1.1 Виробництво комбікормів в Україні та світі

За даними щорічного дослідження Alltech Agri-Food Outlook, у 2024 році загальний обсяг виробництва комбікормів у світі склав приблизно 1,396 млрд т, що на 1,2 % більше, ніж у попередньому 2023 році [37, 112]. Подібний показник відображає відновлення галузі після відносної стагнації 2023 року, коли через низку факторів (зокрема, високі ціни на сировину та проблеми з поширенням пташиного грипу) виробництво було практично без змін. Незважаючи на глобальні виклики, продуктивність комбікормових заводів продемонструвала стійкість та здатність до швидкого відновлення.

У 2024 році на чотири держави припало близько 52% світового виробництва комбікормів: Китай, США, Бразилія та Індія [112, 53]. Зокрема, Китай виготовив понад 350 млн т комбікормів, проте його виробництво зменшилось на 2,03 % порівняно з 2023 роком через коригування внутрішніх аграрних програм і наслідки епізоотичних викликів [112, 53]. Натомість США з невеликим приростом у 0,68 % підтвердили свій статус другого за величиною виробника (понад 225 млн т) завдяки стабільному попиту з боку промислового тваринництва та невеликому зниженню поголів'я у деяких секторах [53, 37]. Бразилія та Індія відзначилися суттєвим зростанням: бразильські комбікормові підприємства наростили випуск на 1,84 % (збільшення на 1,51 млн т), а Індія збільшила обсяги за рахунок розширення свинарських і птахівничих ферм [37, 4].

У Латинській Америці, насамперед у Бразилії, спостерігається значне наростання обсягів виробництва: регіональне зростання за 2024 рік склало понад 1,5 млн т комбікормів, що дозволило Латинській Америці очолити темпи приросту серед інших світових регіонів [37, 112]. У Південно-Східній Азії темпи зростання були меншими, але все ж помітними, завдяки активному розвитку тваринництва в Індонезії, Таїланді та В'єтнамі. У Китаї, який раніше лідирував за темпами, в 2024 році спостерігалось лише помірне збільшення виробництва з урахуванням

внутрішнього скорочення поголів'я на фоні реструктуризації галузі та обмежень на споживання кормів із певними добавками [4, 112]. Водночас у США загальний попит на комбікорми дещо знизився через зменшення поголів'я великої рогатої худоби та свиней (низькі ціни на м'ясо стимулювали скорочення ферм), що призвело до зростання виробництва лише на 0,68 % [37, 53].

Що стосується Європи, то у 2023 році обсяг виробництва промислових комбікормів у країнах-членах ЄС (EU27) становив 146,9 млн т, що на 0,22 % менше, ніж у 2022 році. Зниження було зумовлене особливою ситуацією в секторі свинарства (падіння на 4,1 % через африканську чуму свиней) і енергокризою, викликаною війною в Україні, що вплинуло на вартість сировини й енергії [34]. Водночас виробництво комбікормів для птиці збільшилось на 2,5 %, відображаючи поступове відновлення поголів'я після обмежень 2022–2023 років [35, 30].

За даними FEFAC, у 2024 році загальний обсяг виробництва комбікормів у EU27 зросте до 147,6 млн т (+0,5% порівняно з 2023 роком). Найпомітніший приріст прогнозується в секторі птахівництва: виробництво кормів для птиці збільшиться на 1,3 %, до 49,7 млн т, завдяки поступовому виходу з-під обмежень, пов'язаних із H5N1 у ряді країн (Франція, Іспанія, Португалія) [34]. У той же час виробництво кормів для свиней залишиться практично незмінним (близько 47,7 млн т), оскільки у низці країн (Іспанія +5%, Ірландія +3%, Польща +1,9%) очікується помірна стабілізація, загалом поголів'я свиней продовжує скорочуватися через епізоотії (АЧС) та політичний тиск на скорочення викидів [34]. Сектор кормів для великої рогатої худоби матиме незначні коливання (приблизно +0,3%, до 42,2 млн т), залежно від регіональної забезпеченості грубими кормами [34].

Найбільші виробники комбікормів у ЄС у 2023 році залишаються Іспанія, Німеччина та Франція. На три ці країни припадає близько 45 % загального обсягу виробництва в EU27. Іспанія лідирує у виробництві кормів для птиці (близько 11 млн т у 2023), Німеччина – у секторі великої рогатої худоби (понад 9 млн т), а Франція – у сегменті свинарства (близько 8 млн т) [112].

Серед ключових викликів для європейських виробників комбікормів варто виокремити:

– регуляторний тиск на скорочення викидів метану та інших парникових газів, що спричиняє певні обмеження в інтенсифікації свинарських господарств, особливо в Нідерландах і Бельгії.

– безпекові обмеження через епізоотії (H5N1 та африканська чума свиней), через що деякі країни (Угорщина, Італія, частково Німеччина) припиняли або зменшували виробництво в окремі періоди.

– високі ціни на зернові та олійні культури (у 2023 році їхня вартість зросла в середньому на 15–20 % через енергокризу та збоїв в логістиці), що змушувало комбікормові заводи переглядати рецептури, переходити на альтернативні білкові компоненти та інтенсифікувати закупівлі на внутрішніх ринках [34];

– енергетична вартість виробництва: витрати на електроенергію та газ в ЄС залишаються одними з найвищих у світі, що безпосередньо позначається на собівартості подрібнення і грануляції [34, 35].

Разом із цим сектор демонструє стійкість завдяки високому рівню автоматизації: понад 3200 діючих комбікормових заводів у EU27 уже оснащені сучасними системами контролю рецептур, автоматизованими вагами та інтелектуальними датчиками для коригування складу у реальному часі. Ці технології дозволяють знижувати змінні витрати на 5–8 % і підвищувати точність рецептур [35, 30].

Аналітики прогнозують, що у 2025–2026 роках глобальне виробництво комбікормів продовжуватиме зростати зі середньорічним темпом близько 1–2 %, насамперед завдяки розвитку тваринництва в Африці та Південно-Східній Азії [112, 4]. Зокрема, країни Північної Африки активно інвестують у модернізацію своїх комбікормових підприємств для задоволення зростаючого попиту на молоко та м'ясо: у регіоні очікується приріст виробництва на 3–4 % щорічно. У Південно-Східній Азії, передусім у В'єтнамі та Індонезії, розширюються свинарські та птахівничі комплекси, що стимулюватиме збільшення обсягів виготовлення комбікормових сумішей на 2,5–3 % щороку.

В Україні у 2022 році виробництво комбікормів скоротилося на 11,92% порівняно з 2021 роком (до приблизно 6,16 млн т) через широкомасштабну війну, яка

призвела до руйнувань підприємств, проблем з постачанням сировини та логістичними обмеженнями [97, 162]. За міжнародним опитуванням Alltech, унаслідок військових дій обсяг комбікорму в Україні зменшився більш ніж на 35 % [11].

У 2023 році ємність ринку комбікорму в Україні зросла на 20,5% порівняно з попереднім роком і становила приблизно 7,36 млн т у натуральному вираженні завдяки активному відновленню виробництва у секторі птахівництва, яке є найбільшим споживачем комбікормів в країні (понад 60% ринку) [98]. Зростання в цьому сегменті відбувається через високий попит на яловичину та свинину, а також через поступове відновлення поголів'я птиці після певного зниження під час епізоотій 2022–2023 років.

Основними викликами для виробництва комбікормів в Україні залишаються продовження військових дій, що ускладнює логістику та постачання зернової та олійної сировини, високі ціни на енергоносії та волатильність валютного курсу [11]. Фактором стримування є також нестабільність доступу до портових коридорів для експорту та імпорту компонентів корму, зокрема олійних культур.

Попри це, сектор демонструє ознаки «модернізації»: найбільші групи вже впровадили автоматизовані системи контролю рецептур, точні ваги та сенсорні датчики для корекції складу комбікорму в реальному часі, що дозволяє знижувати змінні витрати на 5–8 % і підвищувати якість продукції [11, 98].

У 2024–2025 роках прогнозується поступове збільшення виробництва комбікормів в Україні до рівня 8–8,5 млн т на рік за умови стабілізації безпекового середовища та сталих державних програм підтримки тваринницьких секторів. Розвиток відбудеться насамперед у сегменті преміальних кормів із високим вмістом функціональних добавок, а також у напрямі збільшення частки відновлюваних джерел енергії на виробництві (біоенергетика) [152].

Проаналізувавши дані Державної служби статистики України [162] видно, що структура споживання комбікормів в Україні схилена на користь птахівництва. Зростання обсягів комбікормів було зумовлено передусім бурхливим розвитком промислового птахівництва. Станом на 2023 рік 63,34 % всього виробленого

комбікорму припадає на птицю, тоді як на свиней – 26,22 %, а на корів – лише 7,52 %. Іншими словами, основними споживачами комбікормів є птахівницькі та свинарські комплекси, тоді як потреби ВРХ покриваються значно меншою мірою.

Згідно з даними Державної служби статистики України [162], щодо динаміки використання комбікормів в Україні за період 2010-2024 роки (рис. 1.1), то ми спостерігаємо стійку тенденцію зростання обсягу комбікормів витрачених на годівлю тварин і птиці. Зокрема в 2018 році цей показник збільшився суттєво (на 30 %). Птахи залишаються домінуючою категорією, на яку припадає найбільша частка комбікормів.

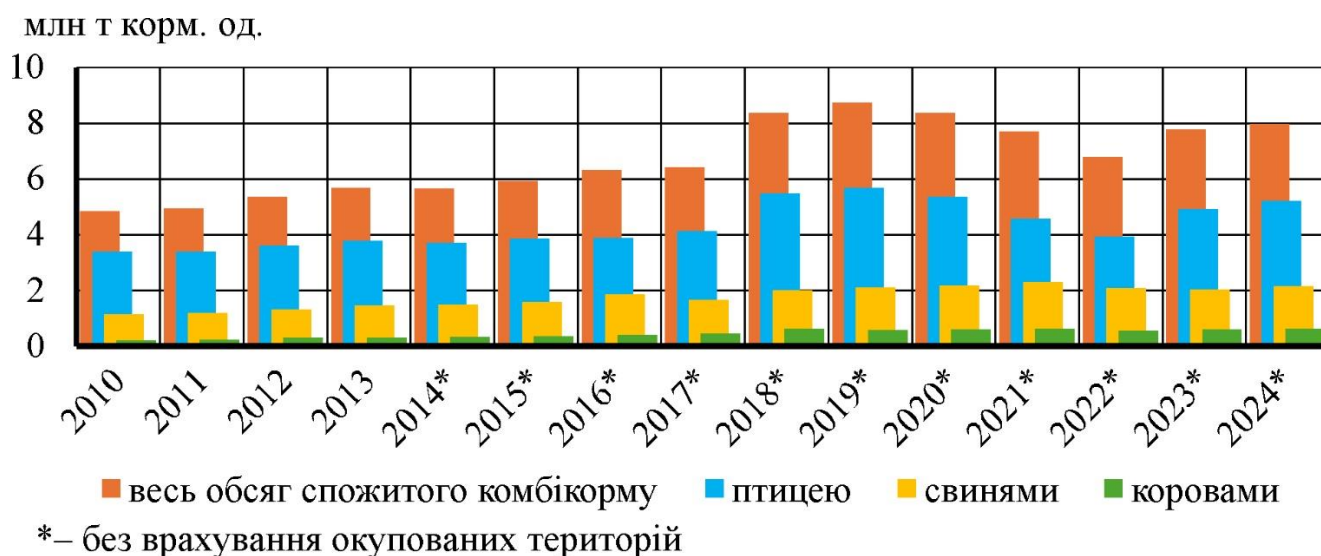
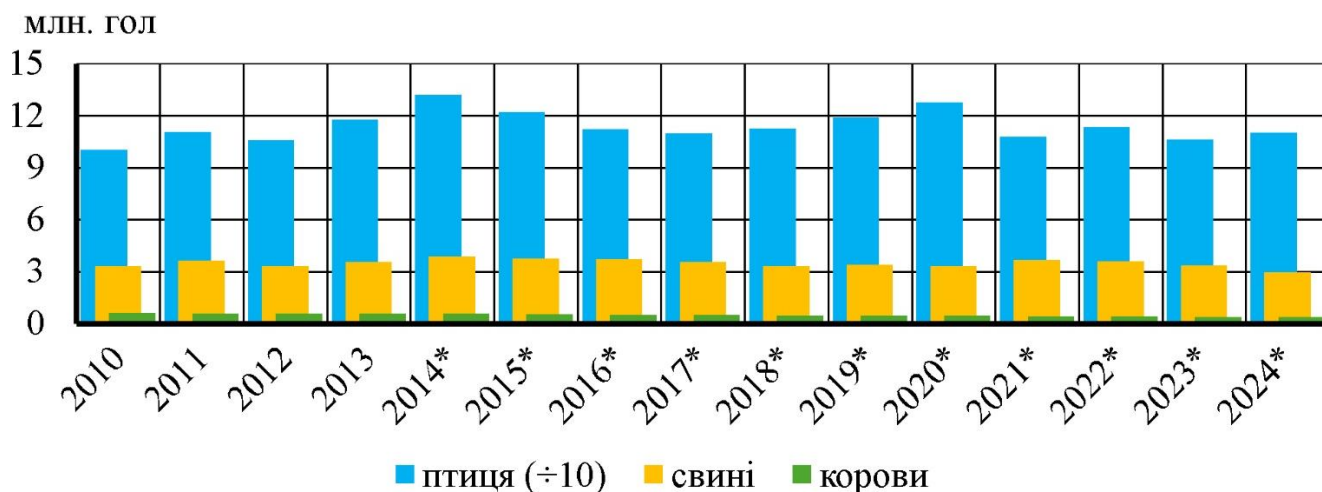


Рисунок 1.1 – Динаміка споживання комбікормів в Україні за період 2010–2024 роки

Причиною цього є структура поголів'я: птахи складають понад 97 % сільськогосподарських тварин основних груп, тоді як поголів'я корів за останні роки скорочується. Крім того, розвиток свинарства в Україні стримується епізоотичними та ринковими факторами – зокрема, епідемією африканської чуми свиней у 2010-х роках, що призвела до скорочення поголів'я свиней і, відповідно, обмеження попиту на комбікорм [189, 163]. Натомість птахівництво переживає підйом, забезпечуючи основний вклад у зростання комбікормової галузі (рис. 1.2).



* – без врахування окупованих територій

Рисунок 1.2 – Поголів'я сільськогосподарських тварин в сільськогосподарських підприємствах України за період 2010–2024 роки

Характерною особливістю комбікормової галузі України є її сировинна база та склад раціонів. Україна традиційно виробляє великі обсяги зернових і олійних культур, що створює сприятливі умови для комбікормового виробництва. Формули українських комбікормів приблизно на 70 % складаються з зернових компонентів (кукурудза, пшениця, ячмінь тощо) і на близько 20 % – з високопротеїнових компонентів, передусім олійних шротів [135]. Зерно є базою комбікормів, забезпечуючи енергію раціону, а основним протеїновим інгредієнтом виступає соняшниковий шрот – побічний продукт переробки насіння соняшнику. Завдяки потужній олійно-екстракційній промисловості Україна в останні роки стала найбільшим у світі виробником та експортером соняшникового шроту [129]. Але, попри наявність власних зернових ресурсів, українська галузь залежить від кон'юнктури світового ринку як сировини, так і добавок. Зокрема, у 2020–2021 рр. спостерігалось суттєве підвищення цін на комбікорми через подорожчання зерна та кормових добавок на світових ринках [194].

Ще однією відмінністю комбікормової галузі України є її структура власності та організація виробництва. На українському ринку домінують великі аграрні холдинги, інтегровані по вертикалі: тобто ті, що самі вирощують зерно, виробляють

комбікорм і утримують поголів'я тварин. Перед повномасштабним вторгненням 2022 року основними гравцями були саме комбікормові заводи, інтегровані в агрохолдинги. Близько третини ринку контролювалося однією компанією – холдингом «Миронівський хлібопродукт» (МХП), найбільшим виробником м'яса птиці в Україні [194]. Іншими помітними виробниками комбікормів є агрокомпанії «Укрлендфармінг», «Овостар Юніон», «АПК-Інвест» та інші, але їхні частки значно менші (на рівні 2–5 %) [194, 79].

Таким чином, ринок висококонцентрований. Великий бізнес переважно виробляє комбікорми для власних потреб і контролює пропозицію. Це відрізняє Україну від, наприклад, країн Західної Європи, де значну частку комбікормів виробляють незалежні комерційні структури та кооперативи, що постачають продукцію широкому колу фермерів. В Україні ж дрібні та середні виробники комбікормів займають менше місце, хоча останніми роками спостерігається інтерес агрофірм до організації власного комбікормового виробництва на фермах [195]. Висока вертикальна інтеграція української комбікормової галузі забезпечує ефективність великих виробництв, але водночас робить ринок менш гнучким та залежним від кількох корпорацій.

Аналітики відзначають, що навіть за наявності сировинної бази Україна поки не реалізувала повний потенціал комбікормової галузі. Значна частина українського зерна досі експортується як сировина, замість того щоб перероблятися на комбікорми та постачатися у вигляді продукції з вищою доданою вартістю [136].

Нинішній стан комбікормової галузі України визначається протилежними тенденціями: з одного боку, інтенсивний розвиток птахівництва та накопичений науково-технічний потенціал стимулюють зростання виробництва комбікормів, а з іншого – військові та економічні фактори створюють серйозні перешкоди. Незважаючи на ці виклики, в довгостроковій перспективі українська комбікормова галузь залишається перспективною завдяки унікальній сировинній базі та потенціалу розширення внутрішнього попиту на комбікорми за рахунок розвитку тваринництва і птахівництва.

1.2 Технологія приготування комбікормів

Комбікорм це – однорідна суміш очищених і подрібнених до необхідних розмірів кормового зерна, мінералів та біологічно активних речовин, приготовлена по науково обґрунтованих рецептах та збалансована за вмістом поживних речовин [106]. Основою комбікорму є зернова сировина, доля якої складає 50–70 % і більше за масою комбікорму [178]. По вмісту і складу поживних речовин кормові зернові культури можна поділити на три групи.

Злакові – пшениця, кукурудза, ячмінь. Зерно злакових культур містить від 7 до 18 % білкових речовин, велику кількість вуглеводів – до 70 % і більше [76]. В зерні злакових присутні жири – 2–6 % і невелика кількість мінеральних речовин – 1,5–4,5 %, головним чином солі фосфору, калію, натрію і кальцію [44]. Зерно всіх злакових містить вітаміни групи В, вітамін Е і провітамін А [108]. Вміст клітковини в зерні злакових культур складає від 2,2 до 10,3 % [76]. Злакові культури застосовують в натуральному вигляді і вони складають основу комбікорму.

До другої групи відносять зерно бобових культур – горох, чечевиця, квасоля, , нут, горошок, люпин, соя та інші. Зерно цих культур по хімічному складу суттєво відрізняється від зерна злакових. Кормова цінність бобових визначається високим вмістом в них біологічно повноцінного протеїну. У порівнянні із злаковими в зерні цих культур міститься в 2–3 рази більше сирого протеїну і в 3–5 разів більше лізину [33]. Зерно бобових культур містить 20–40 % протеїну і невелику кількість вуглеводів – 30–35 % [78]. У порівнянні зі злаковими в зерні бобових більше жиру і мінеральних речовин, особливо кальцію і фосфору, причому фосфору в них в два рази більше, ніж кальцію [33]. У порівнянні з білком молока біологічна цінність зерна бобових становить 75-85 %, тому вони часто використовуються для приготування замінників молока [21]. Зерно бобових культур відрізняється більш високим вмістом вітамінів В₁ В₂, В₆, Е, С та інших [78]. Бобові використовуються у вигляді побічних продуктів переробки (шрот, макуха).

До третьої групи відносять насіння олійних культур – соняшник, льон, ріпак, бавовник [46], які містять багато жиру – 35% і протеїну – до 25%. Насіння льону

містить пектинові речовини, що розбухають у воді і утворюють желеподібну масу, яка при споживанні її тваринами покриває стінки шлунково-кишкового тракту. Тому насіння льону використовують як дієтичний і лікувальний засіб для тварин (особливо для молодняку) при кишкових захворюваннях [82]. Олійні культури застосовують переважно у вигляді макухи або шроту.

Комбікорми є основою раціонів у сучасному тваринництві, причому витрати на корми в структурі собівартості виробництва сягають 64–72% у свинарстві, 68–75% при виробництві м'яса бройлерів та 75–80% при виробництві харчових яєць [172]. Відтак удосконалення технології їх приготування безпосередньо впливає на економічну ефективність галузі та продуктивність тварин.

На сьогодні в свинарстві та птахівництві тварин переважно годують повнораціонними комбікормами в сипкому або гранульованому вигляді, які забезпечують збалансоване надходження білків, вуглеводів, жирів, мінералів і вітамінів без необхідності подальшого балансування раціону [92]. Основу таких комбікормів складають зернові культури – передусім кукурудза, пшениця та ячмінь, які є ефективними джерелами засвоюваного крохмалю й енергії для підтримки росту, розвитку та продуктивності тварин [102]. Крім того, до складу сучасних комбікормів вводять мінеральні та біологічно активні добавки, що сприяють підвищенню перетравності поживних речовин, оптимізації мікробіоти шлунково-кишкового тракту та загального імунного статусу тварин [58].

Устаткування для приготування комбікормів умовно класифікують за рівнем технологічного циклу та масштабом виробництва на два типи. Перший тип – це комбікормові заводи з розвиненим технологічним циклом. Такі підприємства здатні виготовляти білково-вітамінні добавки, білково-вітамінно-мінеральні добавки та повнораціонні комбікорми [10]. Другий тип – установки зі скороченим технологічним циклом. Вони призначені здебільшого для виробництва повнораціонних комбікормів або концентратів на основі зерна, побічних продуктів переробки та готових преміксів, і часто виконуються у вигляді компактних модульних установок для середніх і малих господарств [3]. Серед них виділяються малогабаритні комбікормові установки (МКУ), що встановлюються безпосередньо на фермах і дозволяють оперативно

готувати комбікорм із урахуванням специфічних потреб тварин у поживних речовинах, знижуючи транспортні витрати та залежність від зовнішніх поставок.

За оцінками ФАО, із приблизно 900 млн т загального виробництва комбікормів (600 млн т – у комерційних підприємствах плюс 300 млн т – на фермах) близько 300 млн т, або 30–33 %, виготовляється безпосередньо в господарствах [36]. В Україні близько 40 % комбікормів виготовляється на фермах [188]. Розглянемо установки зі скороченим технологічним циклом, так як саме вони переважно використовуються на тваринницьких і птахівничих підприємствах.

Розглянемо процес виробництва сипкого повнораціонного комбікорму (рис. 1.3), у якому використовується малогабаритна комбікормова установка (МКУ). У технологічному процесі виробництва першою з основних операцій є підготовка сировини, яка включає очищення зернової складової від механічних домішок [22]. Наступним етапом є подрібнення очищеної сировини, де двома ключовими показниками є однорідність продукту – відсотковий розподіл фракційного складу, що оцінюють шляхом ситового аналізу – і питома енергоємність процесу, тобто кількість витраченої енергії на отримання одиниці комбікорму.

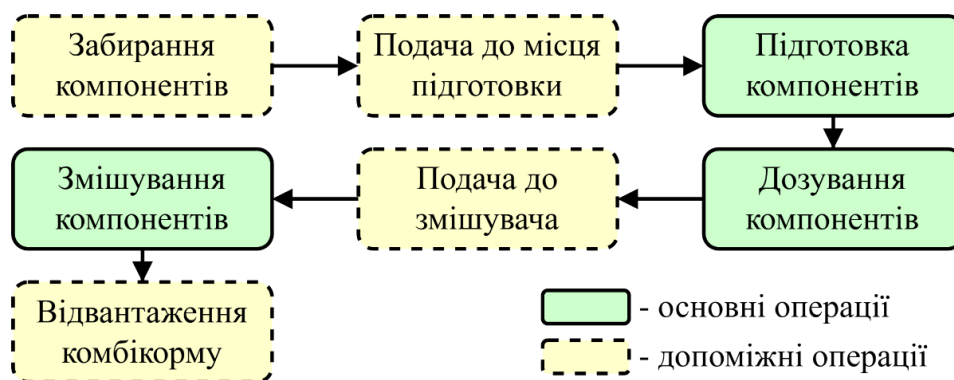


Рисунок 1.3 – Послідовність операцій при приготуванні сипкої комбікормової суміші

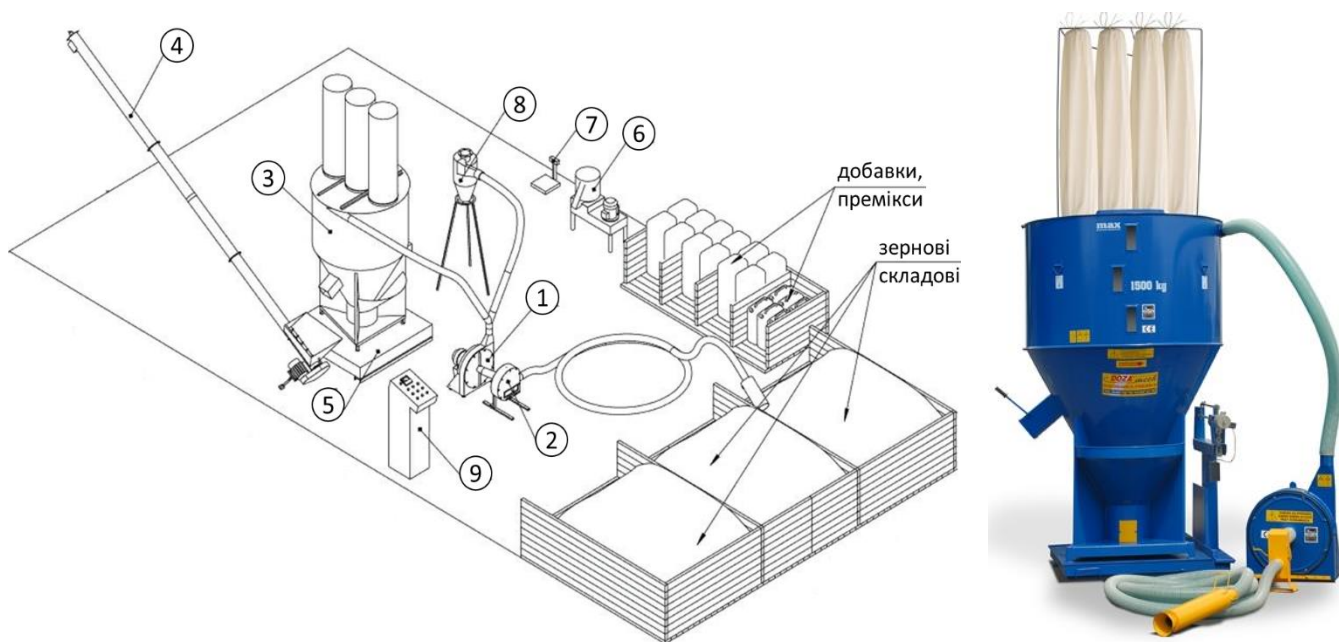
Дозування компонентів перед змішуванням забезпечує відповідність готового комбікорму заданій рецептурі. Точність цієї операції має важливе значення, оскільки будь-яке відхилення призводить до дисбалансу поживних речовин: недостатня

кількість компоненту викликає дефіцит поживних елементів, тоді як надлишкова кількість – перенасичення окремих складових, що особливо критично для мікродобавок (вітамінів, мікроелементів, медикаментів) [49, 32]. У результаті порушується оптимальна збалансованість раціону, що може негативно вплинути на продуктивність тварин, їхній імунний статус та загальний стан здоров'я.

У сучасному виробництві комбікормів віддають перевагу ваговому дозуванню, яке забезпечує значно вищу точність порівняно з об'ємним, особливо при роботі з компонентами, що мають різну насипну щільність та сипкість [95]. Застосування автоматизованих вагових систем дозволяє мінімізувати відхилення від заданих рецептур, скоротити коливання вмісту поживних речовин у кінцевому продукті та забезпечити стабільно високу якість комбікормів.

У малогабаритних комбікормових установках для змішування найчастіше застосовують змішувачі періодичної дії з різною конструкцією робочих органів (лопатеві, стрічкові або шнекові), причому їх ефективність оцінюється за двома ключовими критеріями: однорідністю суміші (зазвичай за коефіцієнтом варіації вмісту найменш вмісного компонента) та питомою енергоємністю процесу [32]. Досягнення високої однорідності при мінімальних енергетичних затратах – основна вимога до конструкції змішувача в умовах фермерського господарства. На схемі (рис. 1.3) показано одностадійне змішування, але за необхідності кормоприготувальне відділення може бути доповнене малим змішувачем для попереднього змішування маловмісних добавок із зерновою основою. Отримана суміш подається до основного змішувача, що дозволяє поліпшити розподіл мікродобавок і зменшити час роботи великого змішувача без шкоди однорідності продукту – підхід, підтверджений експериментальними дослідженнями [148].

Наприклад, установку ККУ-1, розроблену ТОВ «Дозамех Україна», компонують безпосередньо у кормоприготувальному відділенні свиноферми (рис. 1.4) для реалізації повного циклу виробництва розсипного комбікорму.

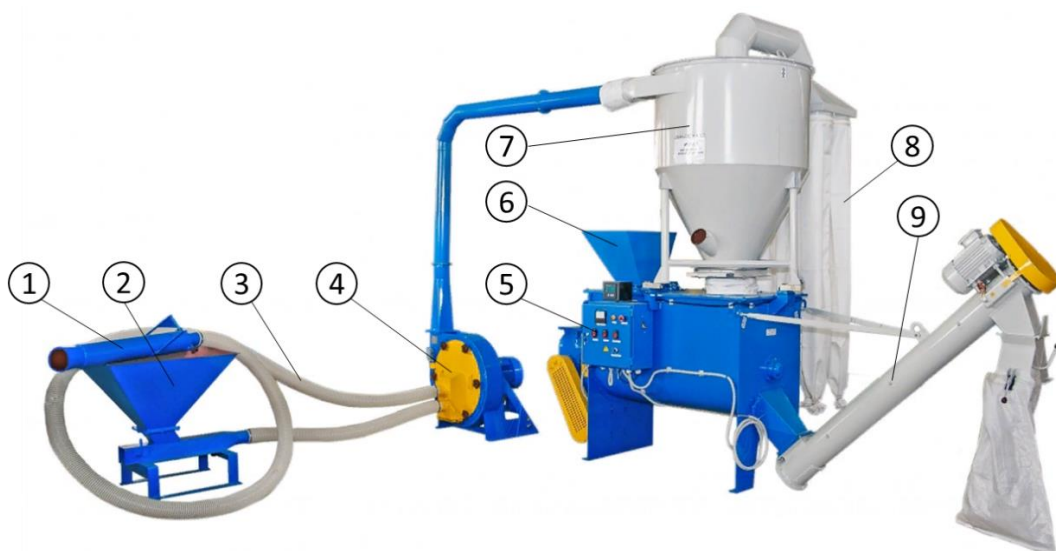


1 – дробарка молоткова; 2 – сепаратор; 3 – основний змішувач; 4 – відвантажувальний шнековий транспортер; 5 – електронні або механічні ваги; 6 – лопатевий змішувач для попереднього змішування; 7 – електронні або механічні ваги; 8 – циклон; 9 – пульт керування

Рисунок 1.4 – Схема компонування кормоприготувального відділення свиноферми [150]

Фуражне зерно за допомогою ежектора транспортують із місця зберігання гнучким шлангом довжиною до 10 м під дією розрідження, створюваного вентилятором дробарки. Далі потік потрапляє в сепаратор, де відділяють металоманітні домішки, пісок та каміння. Після очищення той же повітряний потік подає зерно у подрібнювач, який забезпечує заданий розмір часток. Подрібнений матеріал надходить у змішувач, встановлений на механічних або електронних вагах із автоматизованим контролем ваги за рецептурою. Завантаження компонентів відбувається послідовно, з індикацією досягнення встановленої маси, а компоненти, що не потребують дроблення, вводять через приймальну горловину. Після дозування всіх компонентів здійснюється їх змішування. Готовий комбікорм відвантажується через вихідний патрубок у приймальний бункер вивантажувального шнека (з довжиною до 14 метрів) та надходить безпосередньо в транспортний засіб або накопичувальну ємність.

Переважна більшість малогабаритних комбікормових установок побудовані за описаною вище схемою, а їхні основні відмінності зумовлені типом змішувача. Так, АТ «Хорольський механічний завод» виготовляє установки серії МКУ-0,7 (рис. 1.5), МКУ-1,5 та МКУ-3 із горизонтальними протитечійними (стрічковими) змішувачами періодичної дії [181, 179].



- 1 – ежектор; 2 – бункер завантаження компонентів, які потребують подрібнення;
 3 – гнучкий шланг; 4 – молоткова дробарка; 5 – блок керування роботою; 6 – горловина завантаження преміксів; 7 – ваговий бункер-циклон; 8 – фільтри-пиловловлювачі;
 9 – відвантажувальний шнековий транспортер

Рисунок 1.5 – Малогабаритна комбікормова установка МКУ-0,7 [186]

Найенергоємнішим обов’язковим процесом в лінії приготування комбікормів є подрібнення. Для прикладу далі розглянемо лінії приготування комбікормів.

Обладнання лінії приготування кормів продуктивністю 3 т/год в модульному комбікормовому заводі ЛПК-3М. Дільниця приймання сировини: яма завальна шнекова ЯЗШ-25.00.000 має енергоємність 4,4 кВт; норія Н-5 – 1,1 кВт. Дільниця дозування сировини: конвеєр гвинтовий Ш-160 5м – 2,2 кВт; конвеєр гвинтовий дозуючий Ш-160 1,9м (4 од.) – по 1,1 кВт; затвор шлюзовий дозуючий ШЗХ-10С (2 од.) – по 1,1 кВт. Дільниця подрібнення сировини: відділ подрібнення компонентів ВПК-22.00.000 – 23,65 кВт; норія Н-5 – 1,1 кВт. Дільниця змішування: змішувач

горизонтальний ЗМГ-1000Т – 5,5 кВт; конвеєр гвинтовий МКУ-1,5.08.000 – 1,1 кВт. Загальна енергоємність лінії складає 42,35 кВт [185]. Частка енергоємності процесу подрібнення займає 51,8 %.

Лінія приготування комбікормів компанії Neuero продуктивністю 3 т/год. Молоткова дробарка RVO 852 потужністю 22 кВт, шнек подачі – 1,5 кВт, лотковий шнек – 0,75 кВт, дозуючі електрозасувки – 2 кВт, змішувач FAM – 4 кВт, два шнеки по 3 кВт. Загальна енергоємність лінії складає 36,25 кВт [183]. Частка енергоємності процесу подрібнення займає 64,2 %.

За подібним принципом було проаналізовано інші лінії приготування комбікормів. Зведені дані наведено в таблиці 1.1.

Таблиця 1.1 – Енерговитрати операцій різних ліній приготування комбікормів, кВт

Операція	Транспортування сировини	Підготовка сировини	Дозування сировини	Змішування сировини	Всього
ЛПК-3М (3 т/год) [185]	14,3	23,65	2,2	5,5	45,65
Neuero (3 т/год) [183]	8,25	22	2	4	36,25
Neuero (1,5 т/год) [184]	3,75	22	0,75	4	30,5
МКУ-3 (3 т/год) [187]	3,75	30	1,75	5,5	41
УПК-2,4 (2 т/год) [199]	4	22	1,1	3	30,1

Як бачимо, енергоємність процесу подрібнення становить більше половини енергоємності усієї лінії приготування комбікорму (за відсутністю процесу гранулювання). А тому дослідження в напрямку покращення енергоефективності процесу подрібнення є актуальними.

1.3 Вплив якості комбікормів на ефективність тваринництва

Основна мета приготування комбікормів – забезпечити організм тварини всім необхідним у відповідній пропорції та формі, щоб підтримати її ріст, розвиток, репродукцію і продуктивність (молочну чи м'ясну).

Якість комбікормів є одним із ключових чинників, який визначає продуктивність, здоров'я й економічну ефективність у тваринництві. Ефективність годівлі напряду залежить від таких властивостей корму, як поживна цінність, збалансованість за амінокислотним складом, фізико-хімічні показники та безпечність (відсутність мікотоксинів, патогенів тощо). Розглянемо, як різні властивості якості комбікормів впливають на продуктивні й біологічні показники тварин, а також економічні результати ведення тваринництва.

До основних параметрів якості комбікормів можна віднести:

1. Поживна цінність, яка визначається: обмінною енергією (ME) для свиней та метаболічною енергією (DE, ME, NE) для великої рогатої худоби; перетравним протеїном (реальна кількість амінокислот, доступних для всмоктування в тонкій кишці); балансом незамінних амінокислот (лізин, метіонін, триптофан тощо) [92]; мікро- та макромінералами, вітамінами у відповідності до вимог породи/групи віку [92].

2. Фізико-механічні показники: розмір часток (визначає рівномірність змішування, швидкість перетравлення, тенденцію до пилювання чи ущільнення); вологість і щільність (зокрема для гранульованих кормів, що впливає на стабільність під час тривалого зберігання й транспортування); ступінь подрібнення (у раціонах птахівництва й свиначства дрібніші частинки сприяють більш швидкому засвоєнню енергії, однак за надмалої дрібності може збільшувати ризик диспепсії [51, 90]).

3. Безпека комбікормів: наявність мікотоксинів (афлатоксини, охратоксин А, цералодон тощо) – вони пригнічують імунітет, знижують продуктивність і репродуктивні показники [69]; патогенні бактерії (*Salmonella* spp., *E. coli*) – можуть стати причиною загибелі або зниження продуктивності тварин [57]; рівень антибіотиків та антибіотичних резидуатів (забезпечують профілактику інфекцій, але перевищення допустимих норм призводить до формування резистентності у мікрофлори [43]).

4. Збалансованість технологічних добавок (ферменти, пробіотики, пребіотики, органічні кислоти): ферментні препарати (ксилази, фітази) підвищують доступність фосфору, згортають анти-поживні фактори, що покращує перетравність

і знижує викиди фосфору в навколишнє середовище [134]; пробіотики та пребіотики підтримують нормальну мікрофлору кишечника, знижують ризик дисбіозу й сприяють кращій конверсії корму [107].

Якщо говорити про вплив якісних показників комбікормів на продуктивність тварин та птахів, то при виробництві м'яса, наприклад, встановлено що підвищення рівня перетравного протеїну у раціоні свиней на 1 % збільшує середньодобовий приріст на 25–30 г/голову ($p < 0,05$) [92]. Для індиків і курчат-бройлерів оптимальний баланс амінокислот (лізин, метіонін, триптофан) дозволяє досягти конверсії корму (FCR) на рівні 1,45–1,55 у перші 42 дні життя [92], [90].

В молочному скотарстві підвищення енергетичної щільності раціону високопродуктивних корів із 6,7 Мкал NE_l /кг до 7,2 Мкал NE_l /кг збільшує надої на 2–3 кг молока за добу [91], а достатній рівень лізину (6,8 % від загального протеїну) корелює з підвищенням вмісту білка в молоці на 0,2–0,3 % [41].

В промисловому птахівництві збалансованість кальцій-фосфорного обміну у курей-несучок залежить від правильної концентрації фосфатів у комбікормі: при дефіциті переважно спостерігається зниження несучості на 4–6 % і підвищення кількості неповноцінних яєць [68].

Дослідженнями також встановлено, що наявність мікотоксинів навіть на рівні 200–300 ppb (частин на мільярд) спричиняє пригнічення імунітету, що веде до зниження гематообігу й загальмованої лейкоцитарної реакції [69]. У свиноматок дефіцит ергостеролу (прогенератор холестеролу в організмі) через низьку якість корму знижує запліднюваність на 5–8 % [57]. У птахів деяких кросів (наприклад, кури-несучки Lohmann Brown) надлишок ненасичених жирних кислот у раціоні пригнічує формування шкаралупи, що веде до збільшення кількості неякісних яєць на 3–4 % [116].

Щодо економічної ефективності виробництва продукції тваринництва, то, наприклад, покращення конверсії корму (Feed Conversion Ratio – FCR) на 0,1 одиниці (наприклад, з 1,60 до 1,50 у свиней) при середній ціні комбікорму 0,25 €/кг компенсує додаткові інвестиції в більш високоякісний протеїн уже за 2–3 цикли вирощування

[55]. Щодо птахівництва, то навіть невелике зниження FCR (з 1,70 до 1,60) може зекономити до 6 € на 100 курчат-бройлерів [2].

Витрати на лікування та ветеринарні послуги також можуть залежати від якості комбікормів – у птахівництві профілактика дизентерії за допомогою пробіотичних добавок зменшує смертність на 1,2 %, що дозволяє уникнути збитків у розмірі 0,05 € на курчаті [104]. Також, дослідження GFLI (2023) показало, що у групі корів, яким згодовувались кормові добавки з високим вмістом селену та вітаміну Е, потреба у ветеринарному втручанні знизилась на 18 %, що дало економію близько 12 € на голову за рік [55].

Якщо систематизувати приведену вище інформацію (рис. 1.6), то можна виділити основні етапи формування якості комбікормів в цілому: якість сировини – визначає поживну цінність, умови зберігання впливають на безпеку, обґрунтованість раціонів забезпечує збалансованість кінцевого продукту. Технічне забезпечення процесу приготування впливає на фізико-механічні показники визначальними з яких будуть ступінь та якість подрібнення і однорідність змішування.

Підготовка кормового зерна до згодовування передбачає його подрібнення з отриманням відповідного для виду тварин або птахів гранулометричного складу (фізичний показник якості). Розмір часток подрібненого зерна, що згодовується сільськогосподарським тваринам та птахам, впливає на засвоєння поживних речовин, продуктивність тварин та їх здоров'я [73].

Якщо говорити про ефективність виробництва продукції тваринництва (рис. 1.7) загалом, то доведено [119], що продуктивність сільськогосподарських тварин та ефективність виробництва продукції на підприємстві в основному залежить від 4 основних факторів: корми – якість та збалансованість раціонів годівлі; умови утримання – якість процесів з обслуговування тварин; генетика – порода та селекція; організація – керування стадом та всіма процесами, чітке дотримання технологічних параметрів. При цьому перші три фактори стосуються суто продуктивності тварини, додавши четвертий – отримуємо ефективність підприємства в цілому.



Рисунок 1.6 – Формування якості комбікормів

Відповідно до економічних досліджень, питома вага витрат на корм у загальних витратах виробництва продукції свинарства та птахівництва становить приблизно 65–75% [94]. Такий значний відсоток зумовлює ключову роль кормової складової у структурі собівартості та підкреслює необхідність оптимізації годівлі для підвищення загальної ефективності виробництва.

У моделі формування ефективності виробництва продукції тваринництва (рис. 1.7) центральними є два основні показники – кількість та якість продукції, на які прямо впливає генетичний потенціал поголів'я. Генетика визначає базові продуктивні властивості тварин, тоді як умови утримання опосередковано впливають на повноту

реалізації цього потенціалу. Однак найвизначнішою складовою є якість годівлі, що має безпосередній вплив на якісні та кількісні показники отриманої продукції [9, 67].

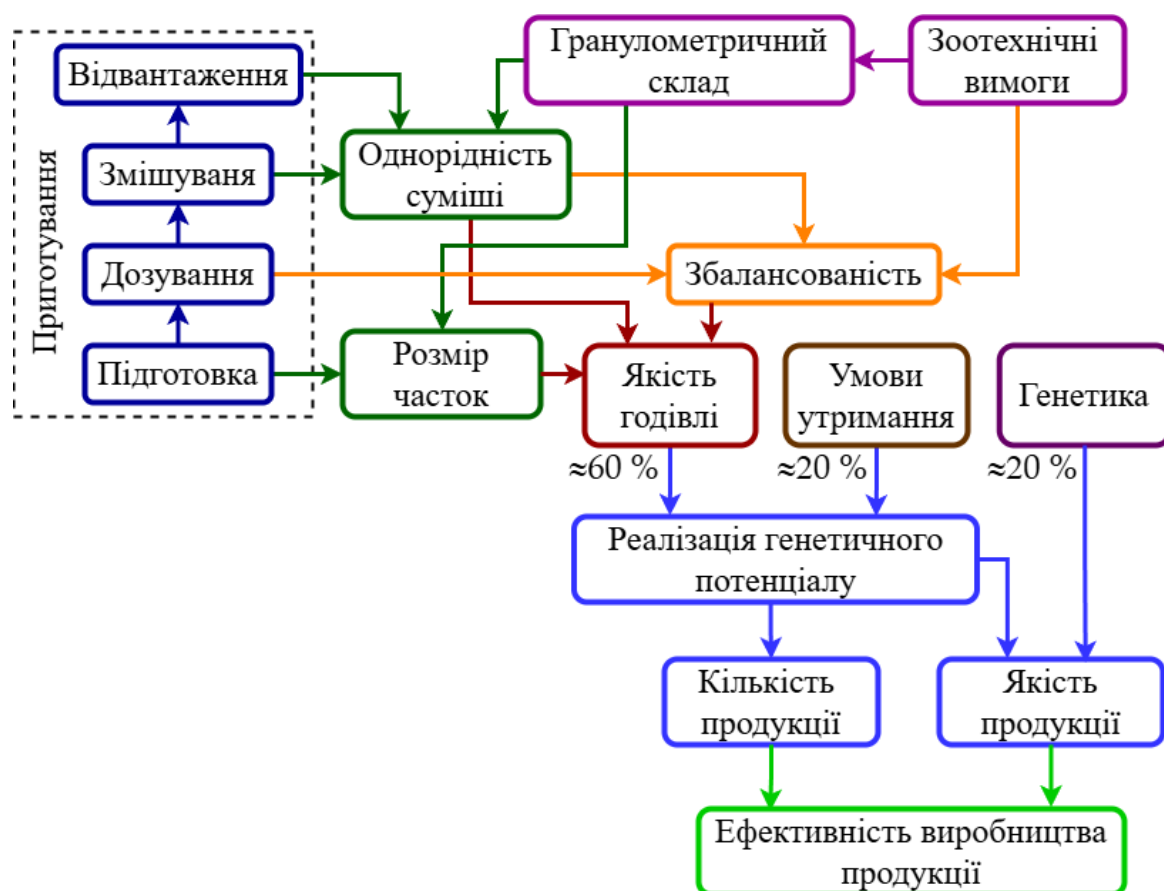


Рисунок 1.7 – Структура формування впливу операцій приготування кормів на якість годівлі і ефективність виробництва продукції тваринництва

Якщо розглядати показник «якість годівлі» як сукупність взаємопов'язаних елементів (рис. 1.7), то можна виокремити дві групи факторів – технологічні та технічні, які обґрунтовані зоотехнічними вимогами. На технологічному рівні ключовим є розробка рецептури із точно визначеним вмістом білків, вуглеводів, жирів, вітамінів та мінералів, що забезпечує оптимальне співвідношення поживних речовин згідно з нормативними рекомендаціями [86]. Водночас на технічній стадії процесу суттєво впливають характеристики обладнання та параметри його налаштування під час виготовлення комбікорму [93]. Крім того, гранулометричний

склад – величина середнього розміру часток, і однорідність перерозподілу компонентів суттєво впливають на швидкість засвоєння поживних речовин, що підтверджено дослідженнями з оптимізації розміру часток у комбікормах [7].

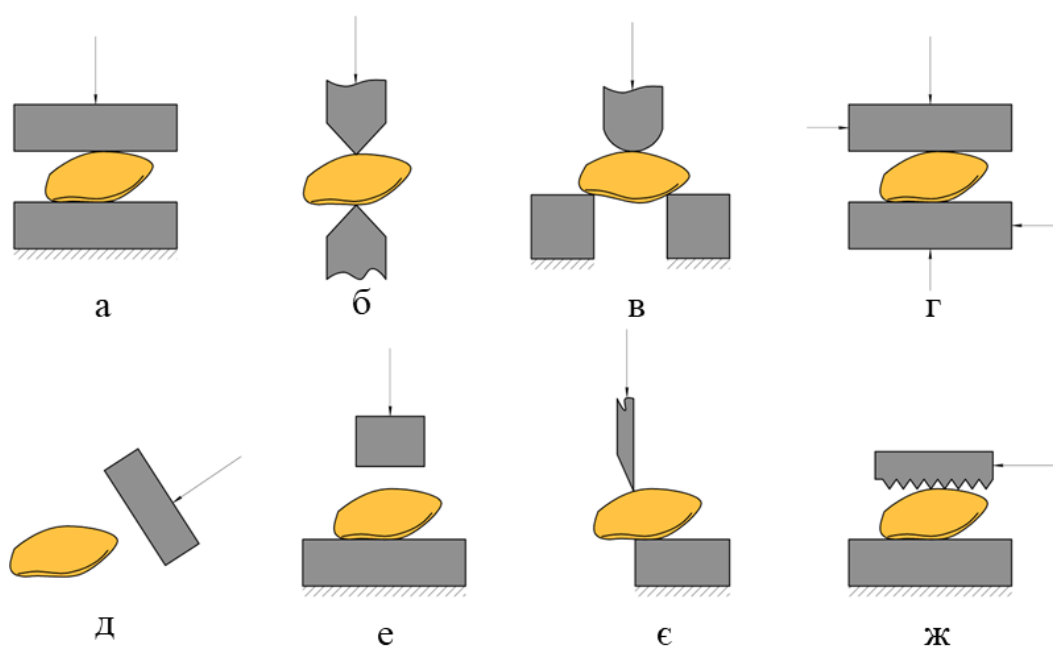
Якщо структуру впливу операцій приготування та роздавання кормів розглядати у вигляді системи (рис. 1.7), то окремі операції можна класифікувати за тим, на яку складову «якості годівлі» вони впливають. Зокрема, підготовка компонентів, а саме подрібнення зернової складової суміші, визначає відповідність розміру часток встановленим нормативам, що здебільшого оцінюється через показник однорідності подрібнення [86]. При цьому надмірне подрібнення, яке призводить до високої частки борошноподібної фракції, негативно позначається на проходженні корму травним трактом і знижує ефективність засвоєння поживних речовин [6]. Отже, оптимальний гранулометричний склад повинен забезпечувати баланс між необхідною мірою подрібнення та мінімізацією надто дрібних фракцій, що підтверджено в низці досліджень з виробництва комбікормів [5].

Таким чином, якість комбікормів є критичним чинником для досягнення високої продуктивності та ефективності у тваринництві, і особливу увагу в цьому контексті слід приділяти однорідності подрібнення. Саме вона визначає рівномірність змішування інгредієнтів і засвоєння поживних речовин, впливає на перетравність корму та здоров'я тварин. Надмірна дисперсність або наявність пилоподібних часток можуть не лише знижувати ефективність годівлі, але й спричиняти негативні фізіологічні реакції. Отже, дослідження, спрямовані на оптимізацію ступеня подрібнення та розміру часток, є актуальними й необхідними для вдосконалення технологій виробництва комбікормів.

1.4 Аналіз способів та обладнання для подрібнення зернових кормів

Подрібнення кормового зерна здійснюють механічними методами – шляхом руйнування структури зернівки під дією зовнішніх сил (удару, стиску, зсуву, стирання тощо) (рис. 1.8). Відомі також спеціальні способи (наприклад, різання,

ультразвукова дезінтеграція тощо), але у виробництві комбікормів переважають механічні дробарки. Залежно від принципу дії, їх можна класифікувати на ударні, стискаючі, ріжучі та комбіновані. Для подрібнення концентрованих кормів знайшли застосування такі типи машин: молоткові дробарки (ударна дія), валкові дробарки (стискання і розтирання), щокові дробарки (стискання), роторні дробарки (ударно-різальна дія), шнекові дробарки (гвинтове пресування зі зсувом) та дискові дробарки (стискання та інтенсивний зсув між дисками). Кожен із цих типів має свою конструкцію і характер роботи, переваги та обмеження.



а – роздавлювання (стиск); б – сколювання; в – розламування; г – перетирання; д – вільний удар; е – стиснений удар; є – різання (або ударне різання); ж – розпилювання

Рисунок 1.8 – Способи подрібнення твердих тіл

Молоткові дробарки є найпоширенішим типом подрібнювачів зерна у комбікормовому виробництві. Молоткова дробарка складається з робочої камери з решетом та ротора, на якому шарнірно підвішені сталеві молотки; ротор обертається з високою швидкістю, заставляючи молотки завдавати ударів по зерну і розганяючи його на удар об внутрішні стінки корпусу. Подрібнений матеріал просіюється крізь отвори решета, які визначають максимальну крупність продукту. Молоткові

дробарки відзначаються простою та міцною конструкцією, невисокою вартістю і великим запасом продуктивності. Вони здатні переробляти широку номенклатуру сировини – від зерна різної твердості до помірно волокнистих матеріалів [15]. За однакової встановленої потужності молоткові дробарки часто забезпечують більшу продуктивність, ніж валкові [15]. До недоліків цього типу належать підвищені енерговитрати на тонке подрібнення, утворення надлишку дрібнодисперсних часток (пилоподібної фракції), шумність і зношування молотків та сит [138, 120]. Проте молоткові дробарки універсальні й прості в експлуатації, тому досі домінують у кормовиробництві. Сучасні конструкції оснащуються змінними ситами, магнітними уловлювачами металу та іноді вентиляторними системами відсмоктування мілких фракцій для зниження запиленості продукту.

У валкових дробарках подрібнення досягається силою стиску і частково зсуву, коли зерно проходить між двома зустрічно обертовими валками. Параметри валків (діаметр, довжина, рифлення або гладкість поверхні, різна швидкість обертання тощо) дають змогу налаштовувати процес подрібнення під конкретну сировину [72]. Наприклад, для пшениці оптимальним є рифлений валок із співвідношенням швидкостей $\sim 2:1$, а для кукурудзи – гладкі валки з рівною швидкістю [72]. Валкові млини традиційно використовуються у борошномельній промисловості, але й у комбікормовій галузі вони знаходять застосування для отримання більш грубих кормів з вузьким гранулометричним складом. Основні переваги валкових дробарок – висока рівномірність подрібнення і менша частка “пилу” порівняно з ударними системами [72]. Також вони є енергоощадними: дослідження свідчать, що для досягнення однакової середньої крупності валковий млин споживає на 30–50% менше енергії, ніж двоступенева система з двох молоткових дробарок [137]. Однак валкові дробарки дорожчі у виготовленні, потребують високоточних механізмів регулювання зазору, чутливі до домішок каменю та металу. Вони малоефективні для дуже твердих зернин і не здатні розмелювати волокнисті матеріали (лушпиння, соломую) [137]. Як правило, валкові системи застосовують для одержання відносно крупного корму (0,8–1,5 мм) із вузьким фракційним складом, придатного для годівлі свиней, птиці та ВРХ без негативних наслідків для травлення [72]. В комбікормових цехах валки інколи

встановлюють перед молотковою дробаркою для попереднього плющення зерна – це дає змогу збільшити продуктивність і зменшити навантаження на молотки та решето.

В дискових подрібнювачах реалізовано принцип інтенсивного перетирання зерна у зазорі між двома плоскими дисками. Історично дискові млини походять від жорен – кам'яних кругів, що використовувалися для розмелювання зерна [77, 191]. Сучасні дискові дробарки мають диски зі зносостійких матеріалів, що обертаються з високою швидкістю, створюючи значні відцентрові сили. Конструкція зазвичай включає один нерухомо закріплений диск і один обертовий (на валу приводу); зазор між дисками точно регулюється і визначає кінцеву крупність часток [87].

Наприклад, у сучасному дисковому подрібнювачі Skiold диск, закріплений на дверцятах корпусу, залишається стаціонарним, а протилежний на валу обертається зі швидкістю до 3000 об/хв; дистанція між ними легко змінюється оператором, що дозволяє оперативно змінювати налаштування подрібнення [114]. Зерно спочатку потрапляє у центральну частину дисків, де здійснюється його попереднє роздавлювання, а потім перемелюється у основній зоні між третювими поверхнями дисків. Дискові робочі органи можуть бути плоскими або конусними. Часто їх поверхня має радіальні рифлення, зубці або отвори для посилення дії [64]. Існують моделі з обома обертовими дисками – так звана мультидискова (дворядна) схема, де на двох паралельних валах закріплено по ряду дисків, що входять у проміжки один одного і обертаються назустріч [121]. Така схема забезпечує інтенсивне різально-зсувне подрібнення зерна при відносно невеликому енергоспоживанні.

Переваги дискових подрібнювачів – висока рівномірність і керованість помелу, можливість гнучкого налаштування під різні компоненти та помірні енерговитрати (особливо для крупного і середнього помелу). На відміну від молоткових, дискові подрібнювачі працюють переважно в режимі різання та тертя, що ефективніше для подрібнення міцних оболонок і волокон.

Серед недоліків дискових систем є зношування дисків (тертьові сегменти потребують періодичної заміни) та дещо більша чутливість до твердих домішок (каміння, металу), що можуть пошкодити робочу поверхню.

В таблиці 1.2 приведено порівняльні характеристики різних типів дробарок

Таблиця 1.2 – Порівняльна характеристика дробарок

Марка	Потужність, кВт	Продуктивність, т/год	Маса, кг	Габарити, мм	Питома енергоємність, кВт·год/т
Молоткові дробарки	Питома енергоємність: 6,4–12,3 кВт·год/т; Питома матеріалоємність: 63–320 кг/(т/год); Середній розмір подрібнених часток: 0,4–0,8 мм [66].				
Сіма А1-ДМ2Р-55	55,5	4,5	1440	1600×1370×2250	12,33
Сіма А1-ДМ2Р-55В	55	8	950	1200×1200×2460	6,88
Сіма А1-ДМ2Р-22В	45	4,5	825	1000×1000×2460	10
Neuero Farm RVO 852	22	3,5	315	–	6,4
Neuero Farm RVO 352	7,5	1,0	205	–	7,5
Вальцеві подрібнювачі	Питома енергоємність: 7,29–12,22 кВт·год/т; Питома матеріалоємність: 285,7–944,4 кг/(т/год); Середній розмір подрібнених часток: 0,9–1,2 мм [66].				
Сімо ВМ-2П	25	3,5	1000	1050×1090×1540	7,29
Теплолідер СВ-3-450	5,5	0,45	425	1200×750×500	12,22
Сімо Р6-ВС-4	4	0,5	455	620×600×1115	8,00
Дискові подрібнювачі	Питома енергоємність: 4,75–18,3 кВт·год/т; Питома матеріалоємність: 91,6–366,7 кг/(т/год); Середній розмір подрібнених часток: 0,4–0,7 мм [172].				
Skiold SK5000	30	2-5,3	335	565×482×921	5,6–15
Skiold SK10T	55	3-12	1100	1654×950×899	4,58–18,3
Skiold SK2500	7,5	0,7-2	120	432×123×629,3	4,75–10,7

Приведені конструкції подрібнювачів довгий час використовуються в комбікормовій промисловості, постійно удосконалюючись, практично досягли меж подальшого розвитку. У зв'язку з цим подальші дослідження у напрямку підвищення ефективності процесу подрібнення кормових зернових матеріалів доцільно спрямовувати на пошук нових конструктивних рішень подрібнювачів або адаптацію існуючих конструкцій з інших галузей промисловості. Зокрема варто звернути увагу на дискові подрібнювачі.

1.5 Аналіз дискових подрібнювачів

Дискові подрібнювачі та млини належать до пристроїв для подрібнення матеріалів, в яких сировина розмелюється між двома дисками, що створюють зусилля стиску та зсуву [133]. Такі апарати набули поширення в різних галузях – від агропромислового комплексу до хімічної і харчової промисловості. Конструктивно дискові подрібнювачі мають два диски з робочими поверхнями, один або обидва з яких обертаються відносно спільної осі, створюючи між собою зону подрібнення з регульованим зазором [99]. Матеріал, потрапляючи в центр дисків, захоплюється обертовим диском і переміщується радіально назовні, розмелюючись у звужуваному проміжку між дисками під дією тиску і тертя. Дискові подрібнювачі забезпечують інтенсивне подрібнення за рахунок комбінації зсувних деформацій і стиску частинок [133]. Диски можуть бути орієнтовані горизонтально або вертикально; відповідно розрізняють машини з вертикальною віссю (горизонтальні диски, напр. у лабораторних або кавових млинах) та з горизонтальною віссю ротора (вертикальні диски, поширені в промислових дробарках). Завдяки своїй універсальності, дискові подрібнювачі застосовуються для грубого, середнього і тонкого подрібнення найрізноманітніших матеріалів. Дискові подрібнювачі концентрованих кормів лише починають впроваджуватись у практику тваринництва, а отже не мають великого поширення. На сьогодні серед промислових виробників найбільш відомим є данський бренд Skiold, який пропонує рішення для комбікормових ліній із використанням дискових подрібнювачів. Дисковий подрібнювач зерна SKIOLD SK2500 (рис. 1.9) має робочі накладки на дисках, які виконано з інструментальних сплавів на основі карбіду вольфраму та кобальту що дозволяє забезпечити роботу дискового подрібнювача без заміни накладок протягом 10000 т зерна. Через обмежену кількість спеціалізованих рішень саме для подрібнення зернової сировини, далі розглянемо подрібнювачі для різних матеріалів, що працюють за схожим принципом дії.

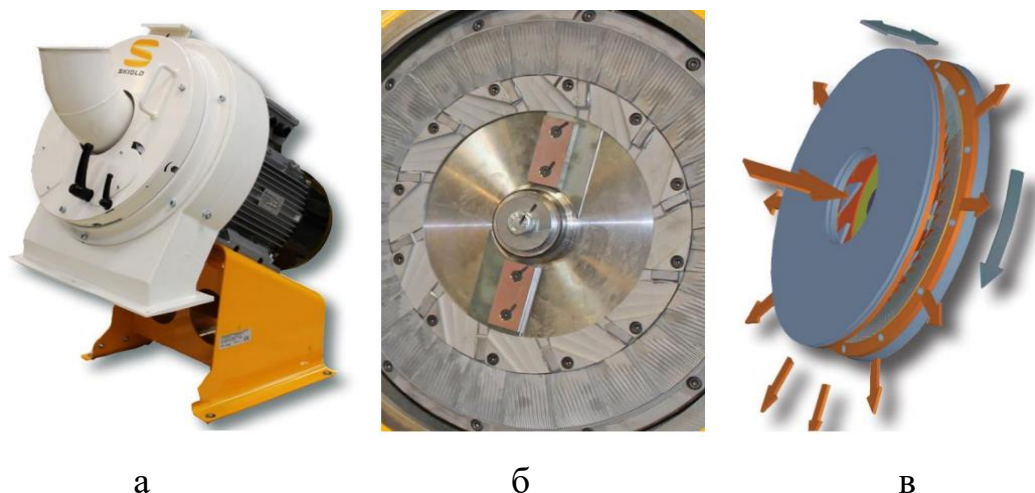


Рисунок 1.9 – Дисківий подрібнювач зерна SKIOLD SK2500 (а), обертовий диск (б) та схема роботи (в)

Дисківі подрібнювачі широко застосовуються у харчовій галузі для перемелювання різних продуктів: цукру, солі, спецій, кавових зернин, горіхів, соєвих бобів тощо. Класичним прикладом є кавомолки з плоскими або конічними дисками, які по суті є малими дисковими млинами. Два зубчасті диски (рис. 1.10), між якими пропускаються обсмажені зерна кави, розтирають їх до порошку. Високоякісні кавомолки оснащені плоскими паралельними дисками, що забезпечують дуже однорідне подрібнення – це критично для екстракції смаку еспreso [103].

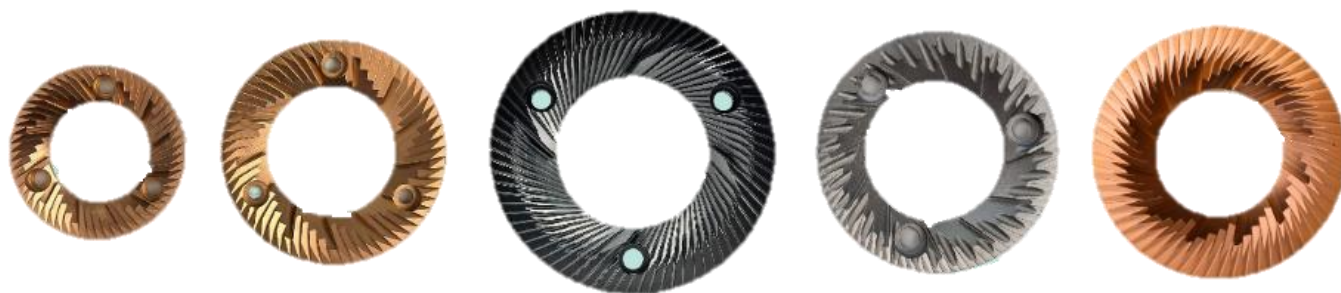


Рисунок 1.10 – Робочі органи дискових подрібнювачів кавових зернин [103]

У лабораторній практиці дискові млини давно стали стандартним засобом підготовки проб. Лабораторний дисковий пульверизатор – це невеликий

подрібнювач, де зразок породи або руди затискається між стаціонарним і рухомим сталевими дисками і розмелюється до порошку тонкістю, придатною для хімічного аналізу. Наприклад, настільний дисковий пульверизатор Bico Pulverizer (рис. 1.11) здатен змолоти 6,4 мм шматочки руди до ~ 75 мкм з продуктивністю $\sim 0,5$ кг/хв [17]. Такий апарат має один диск, що обертається з частотою ~ 800 об/хв, притискаючи матеріал до нерухомого диска; обидва диски оснащені твердосплавними змінними пластинами з рифленням. Завдяки регульованому зазору можна досягати бажаної крупності – від грубої крупки до тонкого порошку. Лабораторні дробарки цього типу використовуються в гірничій геології, металургії, цементній промисловості для підготовки проб перед аналізом [17].



Рисунок 1.11 – Дисковий подрібнювач Bico Pulverizer LC-53 [17]

З огляду на успішні рішення в інших сферах, дискові подрібнювачі мають всі передумови для ширшого застосування в комбикормовому виробництві. Однак специфіка зернової сировини вимагає глибшого вивчення конструктивно-технологічних параметрів, що оптимізують процес подрібнення з урахуванням продуктивності та енергоефективності. Саме це обґрунтування лягає в основу

подальших розділів дисертації, де детально аналізуються вплив характеристик дисків, швидкісних режимів та типів накладок на якість і собівартість кінцевого продукту.

Проведений патентний огляд (додаток А) свідчить про активний розвиток конструкцій дискових млинів, зокрема в напрямку удосконалення геометрії робочих поверхонь, підвищення однорідності помелу та розширення функціональних можливостей обладнання. Інженерні рішення, реалізовані у сучасних млинах, зосереджені на оптимізації траєкторії руху частинок сировини між дисками, що досягається за рахунок логарифмічних, конічних, клиноподібних та спіральних зазорів. Такі конструкції дозволяють не лише підвищити ступінь подрібнення і знизити енерговитрати, але й збільшити час взаємодії частинок з ріжучими поверхнями, що забезпечує одержання більш тонкого і рівномірного помелу без повторного проходу. Значну увагу також приділено універсалізації млинів – низка запатентованих моделей призначені для обробки не лише зернових культур, а й інших матеріалів, включаючи олійні насіння, горіхи, пластмаси, гуму та інші сипкі і в'язкі продукти. Запровадження автоматичного регулювання міждискового зазору відповідно до параметрів сировини підвищує надійність та гнучкість роботи обладнання в реальних умовах. Таким чином, сучасні патентовані рішення демонструють тенденцію до інтеграції високоефективних та адаптивних конструкцій, що забезпечують продуктивну, енергозберігаючу та універсальну роботу дискових подрібнювачів як у харчовій, так і в суміжних галузях переробки.

1.6 Аналіз наукових досліджень

Дискові млини подрібнюють зерно переважно шляхом тертя і різання, що потенційно потребує менше енергії. Згідно з випробуваннями в птахівництві, перехід від молоткової дробарки до дискової дає економію енергії до 80% при тому самому ступені подрібнення кормового зерна [59]. Крім того, в дисковій дробарці отримують менше «грубої» недоподрібненої фракції порівняно з молотковою, і менше пилоподібної фракції – отже корм виходить більш однорідним за розміром часток. Водночас, ефективність багато в чому залежить від конструкції конкретного апарата

і режимів роботи. Так, у дослідженні переробки ямсу на борошно виявлено, що дисковий млин спожив більше енергії, ніж молотковий, щоб досягти необхідної тонкості помелу – хоча й забезпечив дрібніші часточки продукту [16].

Інженерні рішення в галузі дискових подрібнювачів спрямовані на підвищення ефективності, довговічності та адаптивності цих машин. Одна з тенденцій – покращення матеріалів робочих органів. Сьогодні все частіше застосовуються зносостійкі сплави і покриття: наприклад, напилення карбиду вольфраму на зубці, використання керамічних дисків у лабораторних млинах для уникнення металевої контамінації, виготовлення жорен кавомолок з покриттям з алмазоподібного вуглецю для збільшення строку служби [103].

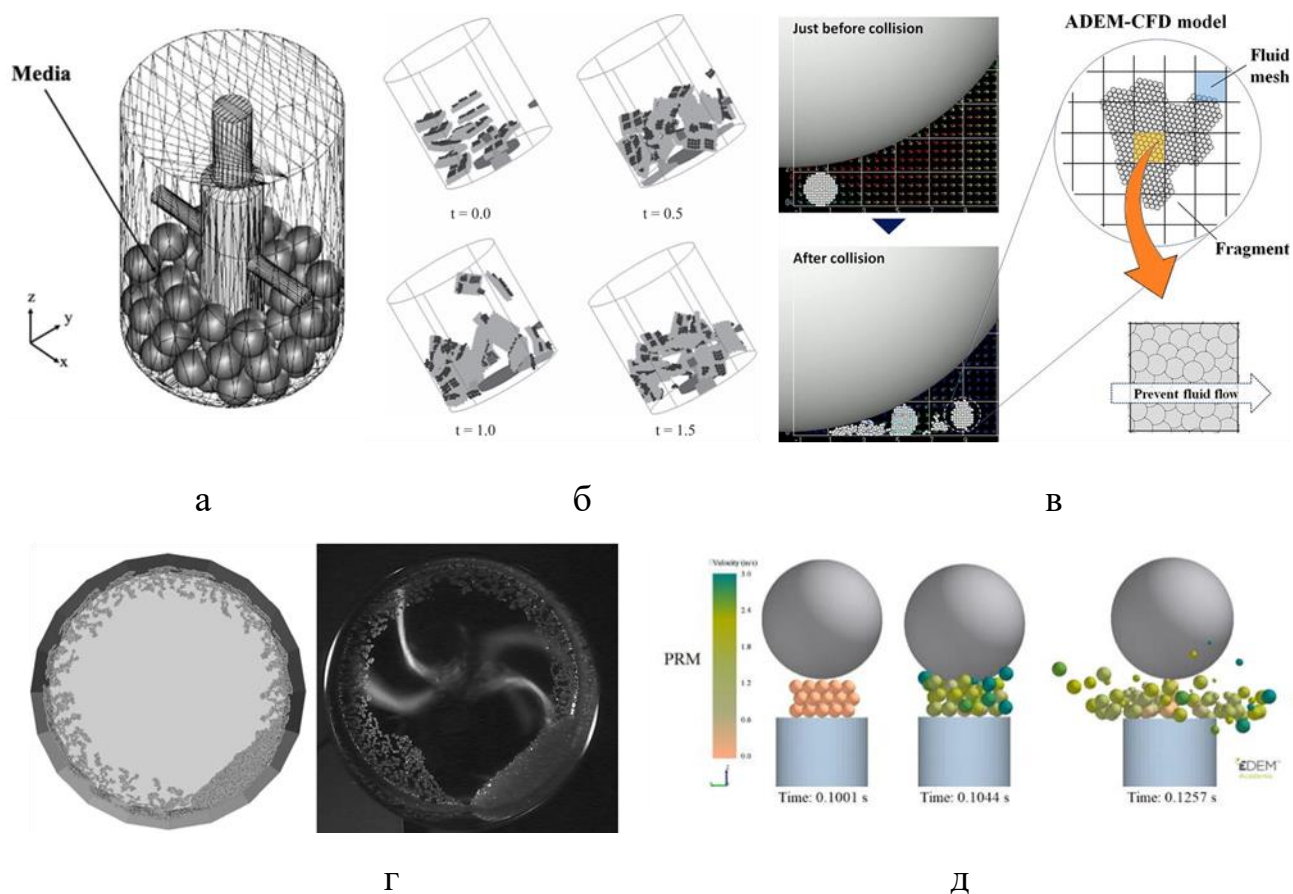
Автоматизація і цифровий контроль – невід’ємна частина сучасних тенденцій. Новітні дискові дробарки оснащують датчиками вібрації, навантаження на двигун, температури підшипників, і системами автоматичного регулювання зазору та подачі. Наприклад, лабораторний дисковий млин преміум-класу дозволяє задати потрібну товщину помелу і автоматично встановлює зазор з точністю 0,01 мм, компенсуючи знос приладу [29]. У промислових установках впроваджується адаптивне керування швидкістю обертання через частотні перетворювачі – при збільшенні навантаження частота дещо знижується, щоб момент зріс і матеріал гарантовано пройшов, після чого знову підвищується для оптимальної продуктивності [132]. Це підвищує енергоефективність і попереджає аварійні зупинки.

Порівняно з іншими типами подрібнювального обладнання, дискові подрібнювачі забезпечують вузький гранулометричний склад продукту, що зумовлено можливістю регулювання зазору між робочими дисками. Проте обмеженим чинником їх застосування є невеликий робочий об’єм, оскільки процес подрібнення відбувається у вузькому проміжку між дисками. Це обумовлює неможливість створення дискових млинів із продуктивністю, що перевищує 500 кг/год [71]. Крім того, під час подрібнення деревної сировини до частинок розміром у кілька десятків мікрометрів енерговитрати сягають 4,2 МВт·год/т, що суттєво перевищує показники інших подрібнювачів [40]. Збільшення частоти обертання або радіуса дисків з метою підвищення ефективності подрібнення

виявляється неефективним, оскільки спричиняє зростання зсувних напружень та перегрів матеріалу в зоні обробки, що може призводити до термічного розкладу компонентів сировини [71].

З початку 1990-х років метод дискретних елементів (DEM) [25] широко використовується для моделювання процесів подрібнення та оцінки ефективності подрібнювачів. У цьому підході поведінка сукупності частинок описується розв'язанням рівнянь руху для кожної частинки й дозволяє апроксимувати сукупні зіткнення як серію дворазових взаємодій (рис. 1.12). Завдяки простоті алгоритму DEM успішно доповнюється зовнішніми силами та застосовується для моделювання транспортних, накопичувальних та фасувальних процесів [126, 50], змішування [127], сепарації [84–122], класифікації за розміром [128] та грануляції [60, 124]. Для врахування впливу потоку повітря DEM часто поєднують із обчислювальною гідродинамікою (CFD) [123]. У дискових млинах та роликових дробарках високого тиску, де частинки залишають камеру лише після подрібнення, невід'ємною є інтеграція моделі руйнування частинок у DEM. Запропоновано два підходи: модель зв'язаних частинок (BPM) [65], де первинна частинка розпадається на зв'язані між собою субчастинки, та модель заміни частинок (PRM), коли один об'єкт замінюється групою дрібніших частинок. Модель T10, розроблена Shi та ін. [109–111], є менш обчислювально витратною та широко застосовується для імітації подрібнення крихких матеріалів [85–13].

У статті Камо та ін. [54] досліджувалося подрібнення поліетиленових (PE) та поліпропіленових (PP) частинок у дисковому подрібнювачі ріжучого типу з різною геометрією лез (рис. 1.13). Метою було оцінити вплив форми лез і властивостей частинок на ефективність подрібнення та схильність до плавлення. Для цього застосовано чисельне моделювання, яке поєднує метод дискретних елементів (DEM), обчислювальну гідродинаміку (CFD) та модель руйнування частинок (T10) [54].



а – моделювання середовищ в дискретно-елементній моделі (DEM) [140];
 б – моделювання DEM з використанням моделі розбиття частинок [141]; в – ADEM-CFD моделі для аналізу руйнівної поведінки агрегатів у кульовому млині [146];
 г – моделювання вологих частинок за допомогою DEM [144]; д – схема руйнування однієї частинки з використанням DEM [152]

Рисунок 1.12 – Приклади використання методу DEM

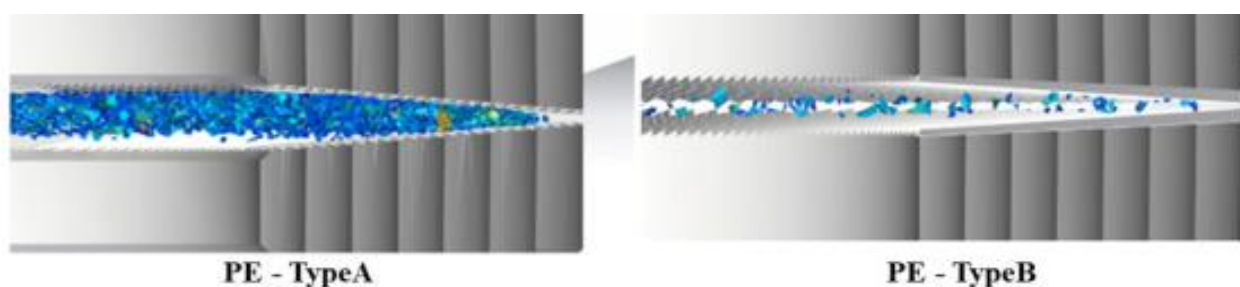


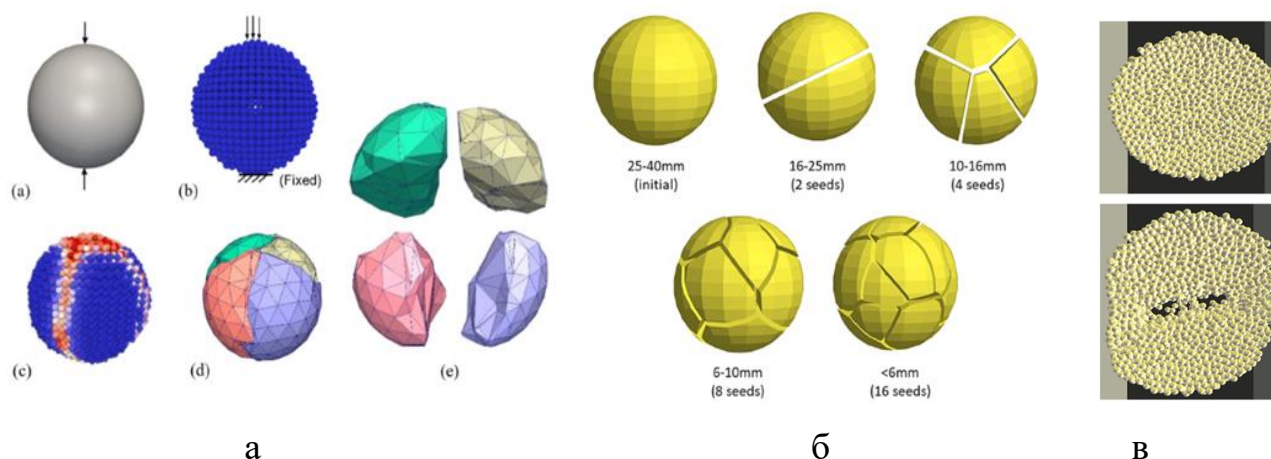
Рисунок 1.13 – Моделювання подрібнення поліетиленових (PE) частинок у дисковому подрібнювачі [54]

Існують різні підходи до моделювання руйнування зерна. Один із методів у середовищі DEM – це зв’язувальний підхід (рис 1.14, а), у якому окремі мікрочастинки зв’язуються тонким прошарком із визначеними механічними властивостями і руйнування цих зв’язків імітує утворення нових поверхонь при навантаженні [96]. У ряді робіт було показано, що цей підхід дозволяє відтворювати накопичення пошкоджень, утворення мікротріщин і їх злиття в макротріщини при досить реалістичних параметрах мікровластивостей [144]. Іншим підходом є методи на основі заміни частинок: коли певний критерій навантаження перевищується, початкова частинка розбивається на набір дрібніших фрагментів, наприклад із використанням алгоритму Вороного (рис. 1.14, б) чи іншого алгоритму розщеплення [27]. Такі моделі можуть бути ймовірнісними, коли ймовірність руйнування та розподіл розмірів дочірніх частинок базуються на експериментальних даних або апріорних спектрах руйнування, що дає можливість передбачити зміну розподілу розмірів зерна в процесі подрібнення [144, 27].

Крім DEM-підходів, для аналізу руйнування зерна можуть застосовуватися моделі балансу популяцій (PBM) (рис 1.14, в), що описують еволюцію розподілу розмірів частинок через ядро руйнування та ядро агрегації в рівняннях інтегрального типу. Такі моделі часто використовують у поєднанні з експериментальними даними для оцінки кінетики руйнування в апаратах подрібнення, але вони не враховують деталі контактної механіки на рівні окремої частинки [47]. Існують також комбіновані підходи, коли DEM використовується для збирання мікромеханічних даних (контактні сили, локальні напруження), а PBM – для макростатистичного прогнозу розмірного складу продукту. Додаткові гібридні методи (наприклад, поєднання DEM із скінченними елементами або методами SPH) застосовують у більш складних сценаріях, але вони потребують значних обчислювальних ресурсів і складніші у валідації [144].

Модель Герца-Міндліна обрана для поточного дослідження передусім через широку підтримку в програмних DEM-пакетах, її відносну простоту та перевіреність для відтворення контактної взаємодії між зернами в умовах еластичного пружного стискування [96, 145]. Ця модель забезпечує коректне описання кривої жорсткості

контакту при невеликих деформаціях, що відповідає типовим умовам контакту зернин у процесі подрібнення. Вона широко підтверджувалася експериментальними вимірюваннями контактних сил і енерговитрат у різних матеріалах, що дозволяє використовувати її як базову основу для подальшого введення руйнуючих механізмів [144]. Завдяки тому, що багато досліджень руйнування зерна побудовані на архітектурі DEM із моделлю Герца–Міндліна як контактним законом, обрана реалізація дозволяє легко інтегрувати додаткові алгоритми руйнування без необхідності зміни базової контактної взаємодії, що спрощує перевірку та порівняння результатів з наявними дослідженнями.



а – метод зв'язаних частинок [144]; б – модель розриву на основі імовірнісної заміни частинок фрагментами Вороного [27]; в – модель балансу популяцій (PBM) [47].

Рисунок 1.14 – Підходи до моделювання руйнування зерна

Як бачимо, переваги застосування DEM-моделювання полягають у тому, що воно дозволяє візуалізувати і кількісно оцінювати поведінку частинок у зоні подрібнення, розподіл сили та зону їхнього руйнування. Це забезпечує глибше розуміння впливу конструктивних параметрів на процес і дозволяє оптимізувати його без проведення великої кількості фізичних експериментів.

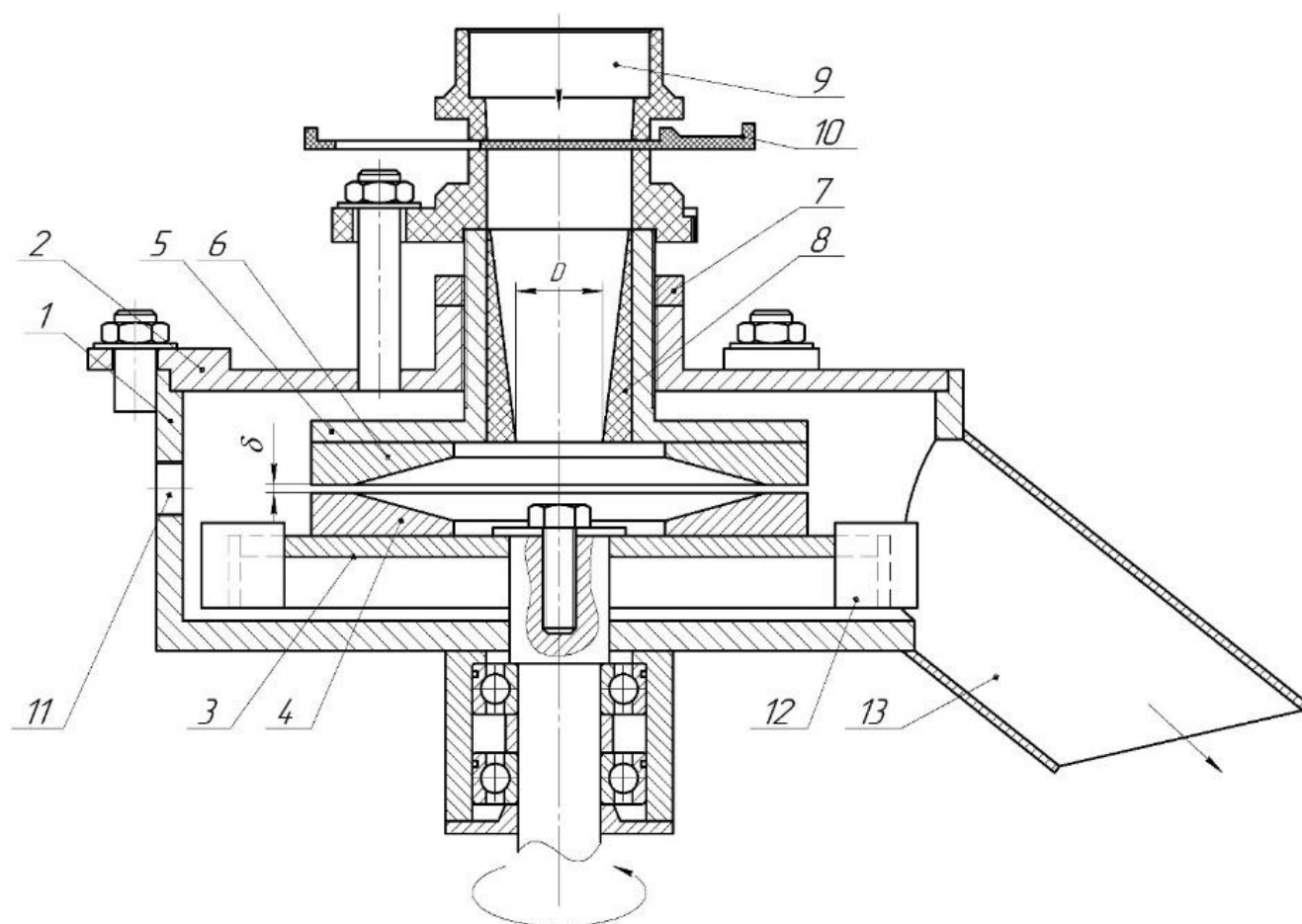
1.7 Обґрунтування конструктивно-технологічної схеми дискового подрібнювача

На розроблений дисковий подрібнювач подано заявку на патент України на корисну модель (u202501193, додаток Б). Розроблений дисковий подрібнювач (рис. 1.15) являє собою пристрій, у якому реалізована можливість точного регулювання конструктивних параметрів з метою дослідження впливу різних факторів на процес подрібнення. Основними його елементами є корпус 1 з верхньою кришкою 2, у якому співвісно закріплені верхній нерухомий диск 6 на тримачі 5 та нижній обертовий диск 4 на тримачі 3, що з'єднаний з електродвигуном за допомогою муфти.

Подача зерна в зону подрібнення здійснюється через завантажувальний патрубок 9 та шиберну засувку 10. Далі зерно проходить через калібровану втулку 8, яка обмежує його кількість (за необхідності), та потрапляє в міждисковий простір. Величина модульного зазору між дисками регулюється шляхом осьового переміщення тримача 5 верхнього диска, що обертається у різьбовому з'єднанні з кришкою 2, з подальшою фіксацією за допомогою контргайки 7. Для контролю зазору використовується набір щупів, які вставляють у спеціальний отвір 11, що у робочому стані закривається болтом.

Після проходження зерна через зону подрібнення, продукт відводиться через патрубок 13, при цьому допоміжну функцію виконують лопаті 12, розташовані на тримачі нижнього диска. Така конструкція забезпечує стабільну подачу, контрольоване подрібнення та ефективне відведення отриманого матеріалу.

Процес подрібнення відбувається наступним чином. Спочатку встановлюється необхідний зазор між дисками шляхом осьового переміщення верхнього диска 6 шляхом обертання гайки 7. Після цього зерновий матеріал завантажують у бункер при закритій засувці 10, після чого вмикається електродвигун, що через муфту приводить у дію нижній диск 4.



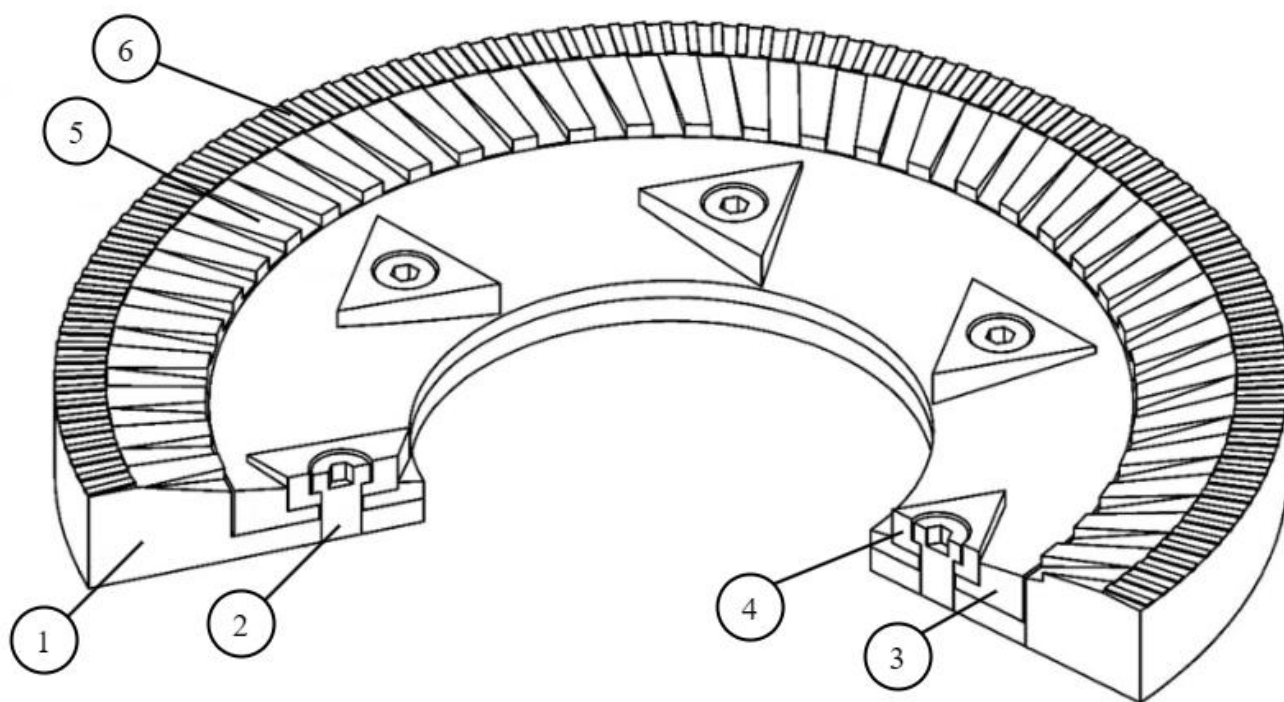
1 – робоча камера; 2 – верхня кришка робочої камери; 3 – тримач нижнього обертового диска; 4 – нижній обертовий диск; 5 – тримач верхнього нерухомого диска; 6 – верхній нерухомий диск; 7 – контр-гайка механізму встановлення модульного зазору; 8 – змінна втулка встановлення подачі матеріалу; 9 – завантажувальна горловина; 10 – шиберна засувка; 11 – отвір для встановлення модульного зазору; 12 – лопать; 13 – патрубок для відводу подрібненого продукту

Рисунок 1.15 – Дисковий подрібнювач концентрованих кормів

Після відкриття заслінки зерно починає надходити до робочої зони – простору між верхнім і нижнім дисками. Під дією відцентрових сил воно переміщується до периферії і зазнає різних типів руйнувань – удару, різання, стирання, стиснення. Подрібнений продукт захоплюється лопатями 12 на тримачі нижнього диска 3 та направляється до виходу робочої камери, звідки виводиться через патрубок 13. Така

конструктивна схема забезпечує стабільний рух матеріалу, рівномірне навантаження на робочі органи та ефективне розподілення зернової маси по всій площині дисків, що, у свою чергу, сприяє досягненню заданої якості подрібнення.

Було спроектовано та виготовлено дослідний зразок робочого органу дискового подрібнювача концентрованих кормів (рис. 1.16), конструкція якого спрямована на поетапну реалізацію різних механізмів руйнування зернового матеріалу. Робочий орган складається з основи 1, до якої за допомогою кріпильних елементів 2 приєднано внутрішній конус 3 та ударні накладки 4. Таке компонування забезпечує можливість регулювання та обслуговування конструктивних елементів при зміні умов подрібнення або проведенні ремонтних робіт.



1 – основа; 2 – кріпильний елемент; 3 – внутрішній конус; 4 – ударні накладки;
5 – зона з конусною похилою насічкою; 6 – зона з горизонтальною прямою насічкою

Рисунок 1.16 – Схема розробленого робочого органу дискового подрібнювача

Внутрішній конус 3 має спеціальні пази для фіксації кута встановлення ударних накладок 4, що дозволяє точно задавати кут положення ударних накладок. Крім того,

основа 1 має дві функціональні зони: зону з конусною похилою насічкою 5 та зону з горизонтальною прямою насічкою 6. Насічки відіграють ключову роль у формуванні доподрібнюючих та шліфувальних дій у другій і третій зонах подрібнення відповідно.

Таким чином, на першому етапі зерно потрапляє до зони дії ударних накладок (поз. 4), де відбувається грубе первинне подрібнення. Це подрібнення відповідає механізму розколювання оболонок зерна при контакті з металевими елементами, які мають значний момент інерції завдяки закріпленню на обертовому диску. Наступним етапом є контакт частково подрібненого зерна з конусними похилими насічками (поз. 5), які розташовані під кутом до площини обертання. Завдяки нахилу цієї поверхні забезпечується додаткове зсувне навантаження, що призводить до подальшого руйнування зерна. Такий тип впливу наближається до принципу стирання й шліфування. Завершальним етапом є проходження частинок крізь зону дії плоских прямих насічок (поз. 6), які формують максимально рівномірний фінішний гранулометричний склад подрібненого матеріалу. У цій зоні остаточне подрібнення відбувається за рахунок дії переважно стискаючих та дотичних сил.

Таке багатоступеневе зонування робочої поверхні дозволяє ефективно реалізувати комбінований принцип дії, що поєднує ударне, розколювальне, роздавлювальне та стираюче подрібнення. Особливо важливою перевагою запропонованої конструкції є її зручність в обслуговуванні та ремонті. Внутрішній конус можна легко замінити на інший, модифікувавши його так як необхідно. Ударні накладки мають три робочі поверхні, що дозволяє при зношенні однієї розвернути ударну накладку. Це спрощує і здешевлює обслуговування робочого органу.

1.8 Висновки до розділу

1. В результаті інформаційного аналізу встановлено, що нинішній стан комбікормової галузі України визначається протилежними тенденціями: з одного боку, інтенсивний розвиток птахівництва та накопичений науково-технічний потенціал стимулюють зростання виробництва комбікормів, а з іншого – військові та економічні фактори створюють серйозні перешкоди. Проте, незважаючи на ці

виклики, в довгостроковій перспективі українська комбікормова галузь залишається перспективною завдяки унікальній сировинній базі та потенціалу розширення внутрішнього попиту на комбікорми за рахунок розвитку тваринництва і птахівництва.

2. За результатами інформаційного аналізу встановлено, що якість комбікормів є критичним чинником для досягнення високої продуктивності та ефективності у тваринництві, і особливу увагу в цьому контексті слід приділяти однорідності подрібнення. Саме вона визначає рівномірність змішування інгредієнтів і засвоєння поживних речовин, впливає на перетравність корму та здоров'я тварин. Надмірна дисперсність або наявність пилоподібних часток можуть не лише знижувати ефективність годівлі, але й спричиняти негативні фізіологічні реакції, що підтверджує необхідність удосконалення технологій з урахуванням фракційного складу. Процес подрібнення формує понад половину загальної енергоємності лінії приготування комбікормів. Це підкреслює актуальність досліджень, спрямованих на підвищення енергоефективності подрібнення як одного з ключових етапів виробництва.

3. За результатами патентно-інформаційного аналізу виявлено, що наявні конструкції молоткових і вальцевих подрібнювачів, хоча й постійно вдосконалювались, наразі практично вичерпали свій інноваційний потенціал. Одним із перспективних напрямів є застосування дискових подрібнювачів, які демонструють потенціал підвищення ефективності процесу обробки зернової сировини. Згідно з проведеним аналізом, дискові подрібнювачі демонструють найнижчі мінімальні значення питомої енергоємності серед розглянутих типів – 4,75 кВт·год/т, що вказує на потенційно вищу енергоефективність за умов оптимального режиму роботи. При цьому їх питома матеріалоємність (91,6–366,7 кг/(т·год)) займає проміжне положення між молотковими та вальцевими подрібнювачами, що свідчить про задовільну конструктивну простоту та технологічну надійність. Важливо також зазначити, що за середнім розміром подрібнених часток (0,4–0,7 мм) дискові подрібнювачі забезпечують високий рівень тонкодисперсного подрібнення, подібний або навіть кращий за молоткові, і суттєво переважають вальцеві подрібнювачі.

4. Обґрунтовано конструктивно-технологічну схему дискового подрібнювача концентрованих кормів, що складається з корпусу, із співвісно встановленими в ньому верхньому і нижньому дисками з центральними і периферійними зонами, при цьому верхній і нижній диск обладнано внутрішнім конусом на якому закріплено ударні накладки, верхній диск має механізм регулювання осьового переміщення для встановлення оптимального зазору.

Основні наукові результати, викладені в цьому розділі, знайшли відображення в публікаціях автора [154, 155, 171].

2 ЧИСЕЛЬНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ПОДРІБНЕННЯ КОМПОНЕНТІВ КОНЦЕНТРОВАНИХ КОРМІВ

2.1 Постановка задачі моделювання

Основною задачею чисельного моделювання є обґрунтування закономірностей взаємодії компонентів концентрованих кормів з робочими елементами подрібнювача для раціонального вибору геометричних та кінематичних характеристик обладнання. Моделювання (симуляція) спрямовано на уточнення параметрів руйнування досліджуваного зерна кукурудзи, пшениці та ячменя. Отримані аналітичні співвідношення і моделі становлять основу для подальшого планування експериментальних досліджень і оптимізації конструкції подрібнювача.

Для відтворення процесу руйнування зерна в симуляції потрібно детальніше дослідити його основні морфометричні і фізико-механічні (в тому числі реологічні) властивості. Зерно зернових культур є складним біологічним матеріалом, який широко досліджують через його морфологічні та механічні характеристики. Знання геометричних параметрів та механічних властивостей зернівок пшениці, ячменя й кукурудзи має велике значення для агроінженерії і технологій переробки. Ці дані використовуються при конструюванні обладнання для очищення, сушіння, зберігання та подрібнення зерна [42, 190]. Зокрема, розміри та форма зерна впливають на ефективність сепарації в зерноочисних машинах і на рівномірність прогріву при сушінні, а механічна міцність визначає опір зернівок руйнуванню в процесі збору й переробки [42].

Зернівки різних культур відрізняються розмірами та формою. Пшениця має відносно дрібні овальні зернівки: середня довжина близько 5–7 мм [117], ширина ~2,5–3,5 мм, товщина ~2–3 мм [115]. Типова маса 1000 зернин пшениці становить 30–45 г [38]. Ячмінь формує більш видовжені зернівки: довжиною біля 8–10 мм [117, 115] при ширині ~3–4 мм і товщині ~2,5–3 мм [117]. Зерно ячменю зазвичай вкрите квітковими плівками (лускою), що надають йому довгастої форми з загостреними

кінцями. Кукурудза має найбільше зерно серед цих культур – крупні округло-клиноподібні зернівки довжиною в середньому 9–12 мм, шириною ~7–8 мм і товщиною ~4 мм [106].

Форма зерна часто характеризується показником сферичності або співвідношенням сторін. Сферичність визначають як відношення діаметра еквівалентної сфери до довжини зернівки [38]. Для пшеничного зерна зазвичай становить ~0,57 (тобто ~57 %), що вказує на помірно витягнуту форму. У кукурудзи зернівки більш округлі: сферичність близько 0,63 (62–63 %) [106]. Натомість ячмінь має значно більш витягнуті, веретеноподібні зернівки – сферичність лише ~0,48 (близько 48 %) [117]. Еквівалентно можна навести співвідношення ширини до довжини зернівки: у кукурудзи воно становить ~0,75, у пшениці ~0,46, а в ячменя ~0,37 [117]. Ці морфометричні параметри підтверджують, що ячмінне зерно є найбільш видовженим (довжина в ~2,5 рази більша за ширину), пшеничне – овально-витягнуте (довжина в ~2 рази більша за ширину), а кукурудзяне – найближче до ізометричного (довжина лише на ~30% перевищує ширину).

Зернівки складаються переважно з міцного ендосперму (внутрішнього крохмалисто-білкового ядра) та зовнішніх оболонок (в тому числі алеїронового шару і плодової/насінневої оболонки у пшениці та кукурудзи, плюс остюкових плівок у ячменю). Механічна поведінка зерна визначається структурою цих компонентів. Модуль пружності (Юнга) зернівок характеризує жорсткість матеріалу ендосперму та оболонок.

При навантаженні зернівки до руйнування визначаються показники міцності на стиск та розтяг, тобто граничні напруження і зусилля, які витримує зерно. Зернівки проявляють характерні властивості крихких матеріалів: вони добре чинять опір стиску, але відносно слабкі на розтяг чи згин [24].

Вологість зерна є ключовим фактором, що впливає на механічні показники. Зі зростанням вологості модуль пружності та максимальна напруга руйнування помітно зменшуються, зате збільшується пластичність і енергія деформації до руйнування [106, 81, 143]. При вологості >15 % зерно пшениці та ячменю стає настільки

пластичним, що при ударі виникає менше уламків – це враховують при помелі, попередньо кондиціонуючи зерно до оптимальної вологості.

2.2 Фізико-математичний апарат симуляції процесу руйнування зерна

У сучасному машинобудуванні широкого застосування набуло проєктування технічних систем на основі моделей (Model-Based Systems Engineering, MBSE). Однією з базових концепцій цього підходу є створення віртуальних прототипів об'єктів та випробування їх характеристик у цифровому середовищі ще до фізичного виготовлення. Застосування MBSE дозволяє суттєво зменшити витрати ресурсів, скоротити час розробки нових машин та удосконалення існуючих конструкцій. Проте слід зазначити, що достовірність результатів такого моделювання безпосередньо залежить від точності та повноти вихідних даних, які використовуються для побудови моделей [176].

Для досягнення високої відповідності результатів моделювання реальному фізичному процесу необхідно створити модель зернини, яка буде максимально наближеною до її справжньої геометрії та фізико-механічних властивостей. Таким чином, завдання полягає не лише у правильному геометричному відтворенні форми об'єкта, але й у точному визначенні характеристик матеріалу.

Руйнування зерна може бути викликане як зовнішніми, так і внутрішніми чинниками. До зовнішніх відносять конструктивно-технологічні параметри обладнання для обробки, до внутрішніх – фізико-механічні властивості самого зерна, які визначаються його анатомічною структурою, текстурою та ступенем зрілості. Дослідження механічних властивостей зерна [64] свідчать, що текстура та структура клітин суттєво впливає на його механічні характеристики.

Метод дискретних елементів (DEM) довів свою ефективність у прогнозуванні пошкоджень зерна в промислових системах обробки. Експериментальні дослідження показали, що ступінь пошкодження зерна має сильну кореляцію з умовами технологічної обробки. Моделювання в середовищі DEM дозволяє оптимізувати технологічні параметри обладнання, що призводить до підвищення точності

прогнозування процесів руйнування зерна [151]. Крім того, метод DEM широко використовується для аналізу поведінки частинок, для яких традиційними експериментальними методами важко визначити дію перехідних сил або процеси розсіювання енергії.

Точність моделювання методом дискретних елементів значною мірою залежить від правильної побудови вхідної моделі, зокрема від її геометричної форми та фізико-механічних властивостей матеріалу [146]. Найбільш розповсюдженим підходом до відтворення складної геометрії зернин є метод агрегації сфер, який передбачає об'єднання кількох перекриваючих сфер для наближеного відтворення форми об'єкта [70, 61]. Такий підхід був успішно застосований для моделювання зернин гороху [141], рису [74], сої [18].

Однак слід враховувати, що навіть у межах одного виду рослин фізико-механічні властивості зерна можуть суттєво варіюватися залежно від сорту, умов вирощування та ступеня зрілості. Тому для підвищення точності чисельного моделювання виникає необхідність у попередньому експериментальному визначенні вихідних характеристик саме для того виду і сорту зерна, який є об'єктом дослідження. Це забезпечить коректність результатів моделювання та їх практичну цінність для вдосконалення процесів подрібнення зернових матеріалів.

На першому етапі дослідження було проведено визначення середніх геометричних розмірів зернин гібрида кукурудзи П8816, пшениці сорту «Патрас» та ячменя сорту «Снігова Королева». Для цього виконали 150 індивідуальних замірів довжини L , ширини W та висоти H зернин (розділи 3.2, 4.1). За результатами статистичної обробки (табл. 4.1–4.3) встановлено, що середня довжина зернини кукурудзи становить $11,12 \pm 1,02$ мм, середня ширина – $8,09 \pm 0,88$ мм, а середня товщина – $4,73 \pm 0,85$ мм; середня довжина зернини пшениці – $6,70 \pm 0,63$ мм, середня ширина – $3,19 \pm 0,30$ мм, середня товщина – $2,89 \pm 0,25$ мм; середня довжина зернини ячменю – $9,31 \pm 0,21$ мм, середня ширина – $3,49 \pm 0,13$ мм та середня товщина – $2,79 \pm 0,10$.

Враховуючи отримані результати вимірювань і базуючись на огляді сучасних досліджень з моделювання біоматеріалів у середовищі Simcenter STAR-CCM+ [2, 13], було створено тривимірні багатосферні моделі зернин кукурудзи, пшениці і ячменя

методом агрегації сфер (рис. 2.1). Такий підхід забезпечує максимально точне відтворення форми зерна при збереженні оптимальної обчислювальної складності для подальших чисельних експериментів.

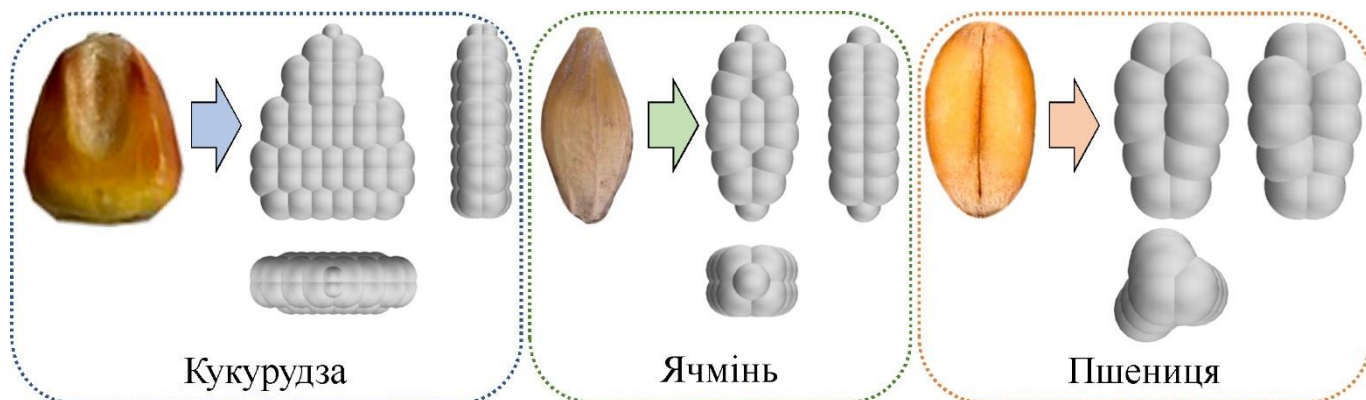


Рисунок 2.1 – Тривимірна модель багатосферних зернин кукурудзи, ячменю та пшениці

Для опису взаємодії між елементами моделі застосували контактну модель Герца–Міндліна, яка дозволяє моделювати пружно-пластичну деформацію тіл при їхньому локальному контакті. Контактна модель Герца–Міндліна є фундаментальним елементом фізико-математичного апарату методу дискретних елементів (DEM), що дозволяє описати сили взаємодії між двома тілами (наприклад, зерниною кукурудзи та пуансоном) при наявності контакту. Ця модель включає як нормальні сили стиску (модель Герца), так і тангенціальні сили зсуву (модель Міндліна), доповнюючи їх дисипативними компонентами і критерієм тертя Кулона. У випадку моделювання зернин у середовищі Simcenter STAR-CCM+ саме ця модель забезпечує адекватне відтворення фізичних процесів пружного стиску, зсуву і кочення.

Модель контактної сили багатосферних зернин представлено на рис. 2.2.

Нормальна $F_{aZ-P-bY}^n$ і тангенціальна $F_{aZ-P-bY}^t$ сили контактної взаємодії сфери a в багатосферній зернині Z і сфери b в точці контакту P задані як:

$$\overline{F_{aZ-P-bY}^n} = \left(\frac{4}{3} E^* \sqrt{R^*} \delta_{aZ-P-bY}^{\frac{3}{2}}, -2 \sqrt{\frac{5}{6}} \beta \sqrt{S_n m^*} v_{aZ-P-bY}^n \right) \overline{n_{aZ-P-bY}}, \quad (2.1)$$

$$\overline{F_{aZ-P-bY}^t} = -\min \left(S_t \overline{\xi_{aZ-P-bY}} + 2 \sqrt{\frac{5}{6}} \beta \sqrt{S_t m^*} v_{aZ-P-bY}^t, \mu_r \left| \overline{F_{aZ-P-bY}^n} \right| \frac{\overline{\xi_{aZ-P-bY}}}{\left| \overline{\xi_{aZ-P-bY}} \right|} \right), \quad (2.2)$$

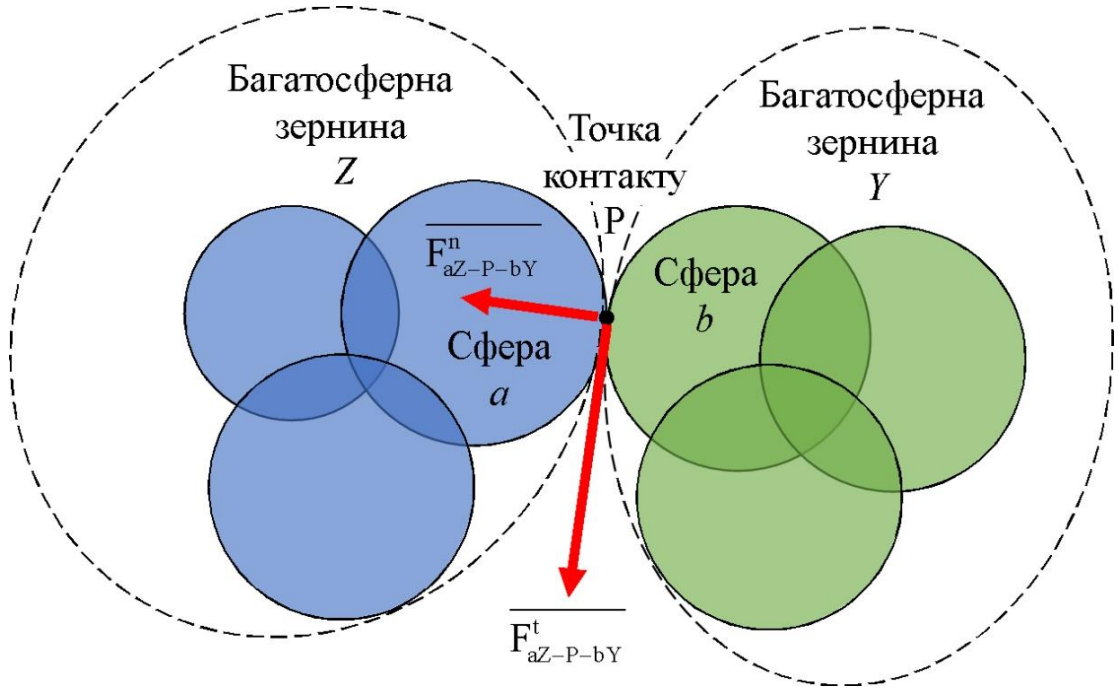


Рисунок 2.2 – Модель контактної сили багатосферних зернин

де E^* – еквівалентний модуль Юнга, R^* – еквівалентний радіус:

$$\frac{1}{R^*} = \frac{1}{R_{aZ}} + \frac{1}{R_{bY}}, \quad (2.3)$$

$$\frac{1}{E^*} = \frac{(1-\nu_Z^2)}{E_Z} + \frac{(1-\nu_Y^2)}{E_Y}, \quad (2.4)$$

R_{aZ} , R_{bY} – радіус кожної сфери в контакті; E_Z , E_Y – модуль Юнга; ν_Z , ν_Y – коефіцієнт Пуассона; $\delta_{aZ-P-bY}$ – нормальне перекриття сфери a в багатосферній зернині Z і сфери b в точці контакту P ; β – коефіцієнт демпфування:

$$\beta = \frac{-\ln e}{\sqrt{\ln^2 e + \pi^2}}, \quad (2.5)$$

e – коефіцієнт відновлення; S_n – нормальна жорсткість:

$$S_n = 2E^* \sqrt{R^* \delta_{aZ-P-bY}}, \quad (2.6)$$

m^* – еквівалентна маса:

$$m^* = \left(\frac{1}{m_{aZ}} + \frac{1}{m_{bY}} \right)^{-1}, \quad (2.7)$$

$\overline{v_{aZ-P-bY}^n}$ – нормальна складова відносної швидкості; $\overline{n_{aZ-P-bY}}$ – вектор нормальної одиниці контакту, який спрямований від точки контакту P до центру часткової сфери a в багатосферній зернині Z ; S_t – тангенціальна жорсткість :

$$S_t = 8W^* \sqrt{R^* \delta_{aZ-P-bY}}, \quad (2.8)$$

W^* – еквівалентний модуль зсуву

$$W^* = \frac{1}{\frac{2(2-\nu_Z)(1+\nu_Z)}{E_Z} + \frac{2(2-\nu_Y)(1+\nu_Y)}{E_Y}}, \quad (2.9)$$

$\overline{\xi_{aZ-P-bY}}$ – сумарне тангенціальне зміщення часткової сфери a в багатосферній зернині Z і сфери b в точці контакту P ; $\overline{v_{aZ-P-bY}^t}$ – тангенціальна складова відносної швидкості; μ_r – це коефіцієнт статичного тертя.

Сили і моменти, що діють на багатосферну частинку z , відповідно виражаються як:

$$\overline{F_{aZ-P-bY}^n} = \sum_W \sum_V \left(\overline{F_{aZ-P-bY}^n} + \overline{F_{aZ-P-bY}^t} \right), \quad (2.10)$$

$$\overline{M_{aZ-P-bY}} = \sum_W \sum_V \left(\left(\overline{x_P} - \overline{x_Z} \right) \times \overline{F_{aZ-P-bY}^t} - \mu_r \left| \overline{F_{aZ-P-bY}^n} \right| \left| \overline{x_P} - \overline{x_Z} \right| \overline{\omega_Z} \right), \quad (2.11)$$

де V і W – номери частинних сфер і точок дотику відповідно; $\overline{x_P}$ – вектор положення точки дотику P ; $\overline{x_Z}$ – вектор положення центру частинки Z ; $\overline{\omega_Z}$ – вектор кутової швидкості багатосферної частинки Z .

Зв'язування частинок використовується для розширення моделі частинок до більш складних (деформівних) форм або структур. Модель скупчення частинок (Particle Clumps Model) використовується для створення груп частинок, які представляють складну форму. У цій моделі застосовується модель зв'язаних частинок, у якій окремі частинки зберігають свою індивідуальність і з'єднані еластично деформівними зв'язками. Додавання моделі пошкодження дозволяє моделювати розтріскування та фрагментацію скупчення зі звільненням складових частинок.

Модель зв'язування частинок використовується як у моделі паралельних зв'язків, так і в моделі зв'язаних частинок (скупчень). У моделі паралельних зв'язків зв'язування частинок використовується для опису взаємодій між складовими частинками, а також для моделювання еластичних зіткнень між частинками відповідно до обраної користувачем моделі еластичного контакту. Модель зв'язаних частинок (Clumps) використовує лише модель зв'язування частинок.

Модель зв'язування частинок моделює кумулятивне пошкодження зв'язків. Якщо взаємодія призводить до пошкодження, але не до повного руйнування, рівень цього пошкодження враховується шляхом зменшення міцності зв'язку.

Для проведення симуляції подрібнення зерна прийнята проста модель руйнування зв'язків (Simple Failure Model Reference), які миттєво руйнуються під навантаженням.

Якщо між частинками (сферами зернини) виникають розтягувальні або зсувні напруження, що перевищують допустимі межі, зв'язок руйнується, і частинки розділяються. Після цього взаємодія частинок при зіткненні визначається іншими обраними моделями міжфазної взаємодії.

Зв'язок між частинками (сферами зернини) руйнується, якщо розтягувальне або зсувне напруження в ньому перевищує одне з заданих користувачем граничних значень.

Зв'язок руйнується, якщо:

$$W_{n-m} > W_{n-max} \text{ або } W_{t-m} > W_{t-max}, \quad (2.12)$$

де $W_{n-\max}$ – максимальна напруга розтягу, яка допускається без руйнування з'єднання;
 $W_{t-\max}$ – максимальна напруга зсуву, яка допускається без руйнування зв'язку. Для подальших розрахунків приймаємо, що $W_{n-\max} = W_{t-\max} = W$.

Граничні значення напруг розраховуються на основі теорії балок таким чином:

$$W_{n-m} = -\frac{\left| \overline{F_{aZ-P-bY}^n} \right|}{A^*} + \frac{\left| (\overline{x_P} - \overline{x_Z}) \times \overline{F_{aZ-P-bY}^t} \right| R^*}{I^*}, \quad (2.13)$$

$$W_{t-m} = \frac{\left| \overline{F_{aZ-P-bY}^t} \right|}{A^*} + \frac{\left| \mu_r \overline{F_{aZ-P-bY}^n} \right| \left| \overline{x_P} - \overline{x_Z} \right| \left| \overline{\omega_Z} \right| R^*}{J^*}, \quad (2.14)$$

де

$$A^* = \pi (R^*)^2, \quad (2.15)$$

$$I^* = \frac{1}{4} \pi (R^*)^4, \quad (2.16)$$

$$J^* = \frac{1}{2} \pi (R^*)^4. \quad (2.17)$$

2.3 Симуляція процесу руйнування зерна стиском

Відповідно до наведеного фізико-математичного апарата симуляції процесу руйнування зерна, всі параметри моделі поділяються на параметри властивостей матеріалу та параметри взаємодії. До параметрів властивостей матеріалу належать щільність частинок, коефіцієнт Пуассона (ν), модуль Юнга (E), гранична напруга на розтяг і гранична напруга на зсув (W). Параметри взаємодії включають коефіцієнт відновлення після зіткнення, коефіцієнт статичного тертя та коефіцієнт тертя кочення (табл. 2.1).

Експериментальне визначення сили руйнування проводили у трьох просторових положеннях зернини: вертикальному положенні, при навантаженні на бічну поверхню та у горизонтальному положенні (рис. 2.3). Такий підхід дозволив врахувати можливі варіації міцнісних властивостей зерна залежно від напрямку прикладення сили.

Таблиця 2.1 – Параметри симуляції DEM

Матеріали / взаємодія	Параметри	Значення
Кукурудза 	Коефіцієнт Пуассона Модуль Юнга, МПа Щільність частинок, кг/м ³ Коефіцієнт відновлення після зіткнення Коефіцієнт статичного тертя Гранична напруга розтягу, МПа Гранична напруга зсуву, МПа	0,3...0,5 10...40 1300 [18] 0,37 [139] 0,2 [75] 1...3 1...3
Пшениця 	Коефіцієнт Пуассона Модуль Юнга, МПа Щільність частинок, кг/м ³ Коефіцієнт відновлення після зіткнення Коефіцієнт статичного тертя Гранична напруга розтягу, МПа Гранична напруга зсуву, МПа	0,3...0,5 10...40 1320 [18] 0,37 [100] 0,2 [100] 1...3 1...3
Ячмінь 	Коефіцієнт Пуассона Модуль Юнга, МПа Щільність частинок, кг/м ³ Коефіцієнт відновлення після зіткнення Коефіцієнт статичного тертя Гранична напруга розтягу, МПа Гранична напруга зсуву, МПа	0,3...0,5 10...40 1250 [18] 0,37 [80] 0,2 [80] 1...3 1...3
Стінка (сталь)	Коефіцієнт Пуассона Модуль зсуву, Па Щільність, кг/м ³	0,3 [12] $7,9 \times 10^{10}$ [12] 7800 [12]
Кукурудза та стінка (сталь)	Коефіцієнт відновлення після зіткнення Коефіцієнт статичного тертя Коефіцієнт тертя кочення	0,5 [18] 0,48 [19] 0,05 [18]
Пшениця та стінка (сталь)	Коефіцієнт відновлення після зіткнення Коефіцієнт статичного тертя Коефіцієнт тертя кочення	0,4 [18] 0,554 [140] 0,05 [16]
Ячмінь та стінка (сталь)	Коефіцієнт відновлення після зіткнення Коефіцієнт статичного тертя Коефіцієнт тертя кочення	0,4 [18] 0,51 [18] 0,05 [18]

У середовищі Simcenter STAR-CCM+ на основі розроблених DEM-моделей зернин було проведено серію віртуальних досліджень процесу руйнування стиском, за якими визначалась залежність зусилля стиску від деформації зернини. Приклад такої залежності представлений на рис. 2.4. Перший максимум залежності і будемо вважати силою руйнування зернини стиском F .

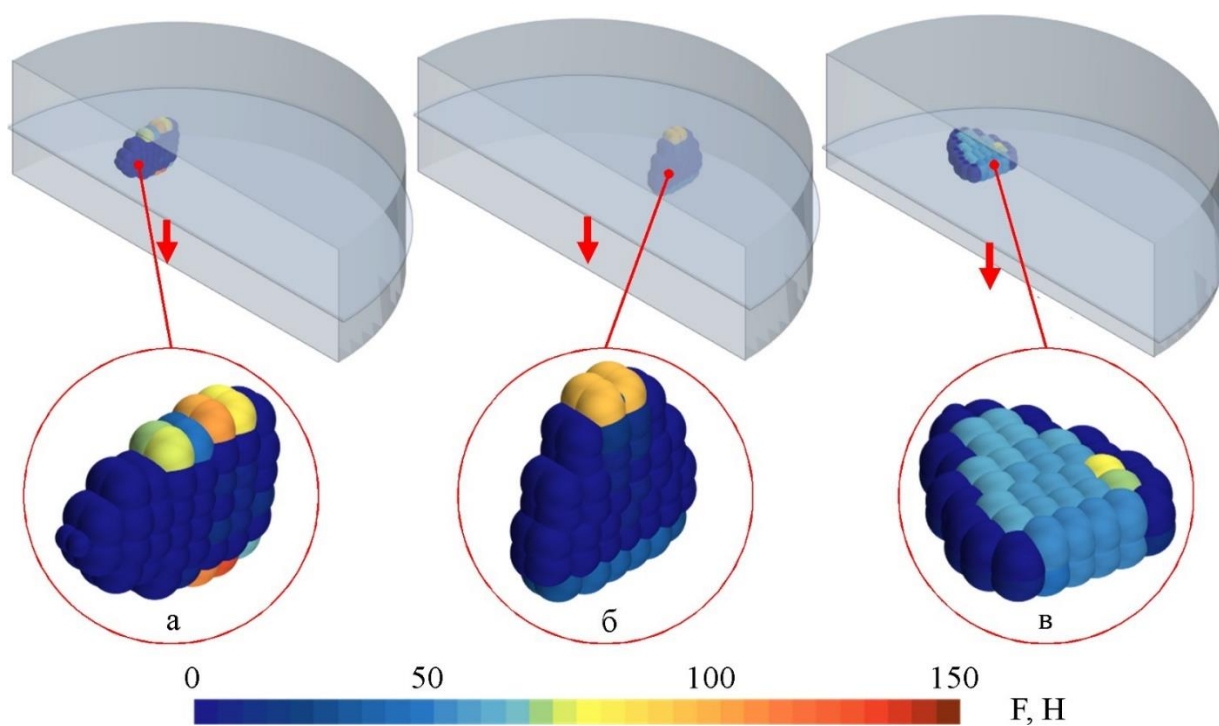


Рисунок 2.3 – Приклад симуляції руйнування зернини кукурудзи стиском у положенні на бічній поверхні (а), вертикальному (б) та горизонтальному (в)

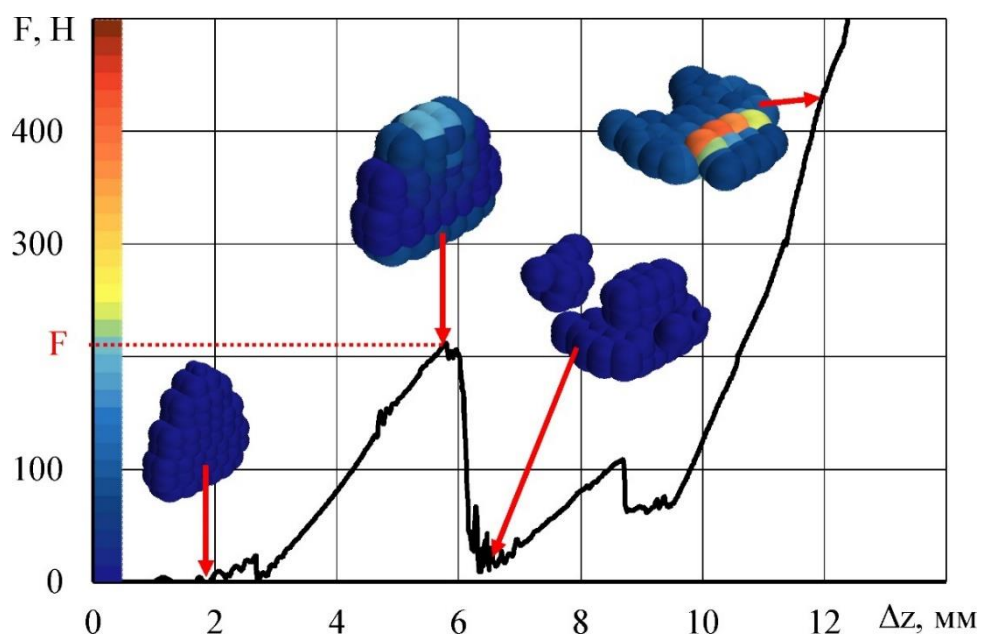


Рисунок 2.4 – Приклад динаміки зміни зусилля при руйнуванні зернини кукурудзи стиском у вертикальному положенні

Для забезпечення комплексної оцінки впливу основних механічних параметрів застосували повний факторний план експерименту. Для першого етапу моделювання за фактори варіювання обрано коефіцієнт Пуассона ν , модуль Юнга E_p та граничну напругу на розтяг і зсув W_p , кожен з яких змінювали на трьох рівнях відповідно до заданої матриці планування (табл. 2.2). Дані фактори обрані через достатньо великі діапазони в літературних джерелах, що не дозволяє однозначно встановити їхні типові значення для моделі зернини конкретної сільськогосподарської культури без проведення попереднього аналізу. З фізичної точки зору, коефіцієнт Пуассона ν характеризує здатність матеріалу до поперечної деформації під дією осьового навантаження, що критично важливо для коректного опису міжчастинкової взаємодії при стисненні або розтягуванні. Модуль Юнга E_p визначає жорсткість частинок, тобто величину деформації, яка виникає внаслідок дії напружень, і безпосередньо впливає на швидкість розповсюдження напружень у контактах. Гранична напруга на розтяг і зсув W_p задає порогові значення для руйнування контактів між частинками – це ключовий параметр для імітації механізму розриву зв'язків у матеріалі під дією навантаження. Варіювання цих параметрів дозволяє виявити чутливість моделі зернини сільськогосподарських культур до змін фізико-механічних властивостей частинок і забезпечує основу для подальшого калібрування моделі з урахуванням даних лабораторних досліджень (розділи 3.2, 4.1).

Таблиця 2.2 – Рівні та інтервали варіювання факторів

Показник	Коефіцієнт Пуассона ν	Модуль Юнга E_p , МПа	Напруга розтягу та зсуву W_p , МПа
	x_1	x_2	x_3
Верхній рівень (+1)	0,5	40	3
Основний рівень (0)	0,4	25	2
Нижній рівень (-1)	0,3	10	1
Інтервал варіювання	0,1	15	1

Отримані в результаті віртуального експерименту дані (додаток В) було оброблено із використанням хмарного обчислювального середовища Wolfram Cloud

за методикою, яка наведена в розділі 3.7. Це дозволило побудувати рівняння регресії в закодованому вигляді, що описують залежність сили руйнування F зернини кукурудзи від досліджуваних факторів.

Для кукурудзи:

– у горизонтальному положенні:

$$F_g^c = 658,926 + 406,833x_1 + 51,7222x_1^2 - 45,3889x_2 - 6,25x_1x_2 - 16,2778x_2^2 + 443,167x_3 + 405,333x_1x_3 - 9,66667x_2x_3 + 155,389x_3^2. \quad (2.18)$$

– на бічній поверхні:

$$F_l^c = 433,37 + 252,722x_1 + 21,0556x_1^2 - 23,1111x_2 - 18,1667x_1x_2 - 13,7778x_2^2 + 345,167x_3 + 271,5x_1x_3 - 5,75x_2x_3 + 159,056x_3^2; \quad (2.19)$$

– у вертикальному положенні:

$$F_v^c = 351,37 + 155,111x_1 + 38,8889x_1^2 - 11,3333x_2 + 1,91667x_1x_2 + 3,22222x_2^2 + 104,389x_3 + 135,583x_1x_3 - 4,33333x_2x_3 + 9,38889x_3^2; \quad (2.20)$$

Для пшениці:

– у горизонтальному положенні:

$$F_g^w = 210,464 + 22,9631x_1 + 39,284x_1^2 - 3,60578x_2 - 3,416x_1x_2 - 2,84667x_2^2 + 81,0351x_3 - 1,42333x_1x_3 - 10,9597x_2x_3 + 17,08x_3^2. \quad (2.21)$$

– на бічній поверхні:

$$F_l^w = 175,923 + 20,0581x_1 + 34,3251x_1^2 - 14,0178x_2 - 1,57167x_1x_2 + 3,5595x_2^2 + 57,0414x_3 + 2,66213x_1x_3 - 14,5327x_2x_3 + 1,03541x_3^2; \quad (2.22)$$

– у вертикальному положенні:

$$F_v^w = 172,57 + 11,9735x_1 + 23,2732x_1^2 - 11,4552x_2 + 1,47725x_1x_2 - 0,673833x_2^2 + 52,3517x_3 - 1,47725x_1x_3 - 8,94125x_2x_3 - 17,6233x_3^2; \quad (2.23)$$

Для ячменя:

– у горизонтальному положенні:

$$F_g^b = 72,9259 + 22,9167x_1 + 25,3722x_1^2 - 8,12222x_2 - 4,28333x_1x_2 + 3,25556x_2^2 + 57,15x_3 + 0,991667x_1x_3 - 14,2167x_2x_3 + 20,8389x_3^2; \quad (2.24)$$

– на бічній поверхні:

$$F_1^b = 50,137 + 13,85x_1 + 17,3056x_1^2 - 3,83333x_2 - 1,06667x_1x_2 + 1,18889x_2^2 + 38,6056x_3 - 0,766667x_1x_3 - 5,61667x_2x_3 + 14,3389x_3^2; \quad (2.25)$$

– у вертикальному положенні:

$$F_v^b = 35,1963 + 10,5056x_1 + 12,4944x_1^2 - 3,58889x_2 - 1,56667x_1x_2 - 0,155556x_2^2 + 27,0x_3 - 0,316667x_1x_3 - 5,64167x_2x_3 + 9,91111x_3^2; \quad (2.26)$$

Статистична обробка рівнянь (2.18)–(2.26) приведена в таблицях 2.3–2.5.

Таблиця 2.3 – Результати статистичної обробки рівнянь (2.18)–(2.20)
модельовання процесу руйнування кукурудзи

Коефі- цієнт	Значен- ня	По- хибка	Коефіцієнт Стьюдента	Рівень значущості	Дисперсійний аналіз	
Горизонтальне положення (2.18)						
k ₀₀	658,926	19,69	33,451	5,9083·10 ⁻¹⁷	Сума квадратів відхилень	
k ₁₀	406,833	9,11	44,6162	4,6562·10 ⁻¹⁹	Модель	2,53739·10 ⁷
k ₂₀	-45,388	9,11	-4,97766	0,000114825	Помилка	25443,1
k ₃₀	443,167	9,11	48,6007	1,0993·10 ⁻¹⁹	Оцінка дисперсії	
k ₁₂	-6,25	11,16	-0,559642	0,583023	Модель	2,53739·10 ⁶
k ₁₃	405,333	11,16	36,2946	1,5030·10 ⁻¹⁷	Помилка	1496,65
k ₂₃	-9,6666	11,16	-0,865579	0,398772	Критерій Фішера	
k ₁₁	51,7222	15,79	3,27486	0,00446596		
k ₂₂	-16,277	15,79	-1,03065	0,317147	Розраховане	1695,38
k ₃₃	155,389	15,79	9,83864	1,96416·10 ⁻⁸	Табличне	2,11
Положення на бічній поверхні (2.19)						
k ₀₀	433,37	23,43	18,4893	1,0758·10 ⁻¹²	Сума квадратів відхилень	
k ₁₀	252,722	10,85	23,2921	2,4473·10 ⁻¹⁴	Модель	1,23462·10 ⁷
k ₂₀	-23,111	10,85	-2,13003	0,0480751	Помилка	36024
k ₃₀	345,167	10,85	31,8122	1,3702·10 ⁻¹⁶	Оцінка дисперсії	
k ₁₂	-18,166	13,28	-1,36708	0,189406	Модель	1,23462·10 ⁶
k ₁₃	271,5	13,28	20,431	2,1116·10 ⁻¹³	Помилка	2119,06
k ₂₃	-5,75	13,28	-0,4327	0,670672	Критерій Фішера	
k ₁₁	21,0556	18,79	1,12039	0,278125		
k ₂₂	-13,777	18,79	-0,733134	0,473466	Розраховане	582,63
k ₃₃	159,056	18,79	8,46356	1,68111·10 ⁻⁷	Табличне	2,11
Вертикальне положення (2.20)						
k ₀₀	351,37	18,28	19,216	5,747·10 ⁻¹³	Сума квадратів відхилень	
k ₁₀	155,111	8,464	18,325	1,2435·10 ⁻¹²	Модель	4,87878·10 ⁶
k ₂₀	-11,333	8,464	-1,33893	0,198222	Помилка	21923,9

Коефі- цієнт	Значен- ня	По- хибка	Коефіцієнт Стьюдента	Рівень значущості	Дисперсійний аналіз	
k_{30}	104,389	8,464	12,3326	$6,6152 \cdot 10^{-10}$	Оцінка дисперсії	
k_{12}	1,91667	10,36	0,184885	0,855507	Модель	487878
k_{13}	135,583	10,36	13,0786	$2,6677 \cdot 10^{-10}$	Помилка	1289,64
k_{23}	-4,3333	10,36	-0,418002	0,681178	Критерій Фішера	
k_{11}	38,8889	14,66	2,65257	0,016751		
k_{22}	3,22222	14,66	0,219784	0,828657	Розраховане	378,31
k_{33}	9,38889	14,66	0,640406	0,530447	Табличне	2,11

Таблиця 2.4 – Результати статистичної обробки рівнянь (2.21)–(2.23)
моделювання процесу руйнування пшениці

Коефі- цієнт	Значен- ня	По- хибка	Коефіцієнт Стьюдента	Рівень значущості	Дисперсійний аналіз	
Горизонтальне положення (2.21)						
k ₀₀	210,464	8,92	23,5693	2,01·10 ⁻¹⁴	Сума квадратів відхилень	
k ₁₀	22,9631	4,13	5,55526	3,48926·10 ⁻⁵	Модель	1,77641·10 ⁶
k ₂₀	-3,6057	4,13	-0,872313	0,395191	Помилка	5228,47
k ₃₀	81,0351	4,13	19,6041	4,15·10 ⁻¹³	Оцінка дисперсії	
k ₁₂	-3,416	5,06	-0,674754	0,508905	Модель	177641
k ₁₃	-1,4233	5,06	-0,281148	0,78199	Помилка	307,557
k ₂₃	-10,959	5,06	-2,16484	0,0449189	Критерій Фішера	
k ₁₁	39,284	7,15	5,48692	4,00907·10 ⁻⁵		
k ₂₂	-2,8466	7,15	-0,397603	0,695871	Розраховане	577,59
k ₃₃	17,08	7,15	2,38562	0,028956	Табличне	2,11
Положення на бічній поверхні (2.22)						
k ₀₀	175,923	5,30	33,1529	6,86·10 ⁻¹⁷	Сума квадратів відхилень	
k ₁₀	20,0581	2,45	8,16567	2,76·10 ⁻⁰⁷	Модель	1,17943·10 ⁶
k ₂₀	-14,017	2,45	-5,70665	2,57056·10 ⁻⁵	Помилка	1846,36
k ₃₀	57,0414	2,45	23,2216	2,57·10 ⁻¹⁴	Оцінка дисперсії	
k ₁₂	-1,5716	3,00	-0,522417	0,608121	Модель	117943
k ₁₃	2,6621	3,00	0,884884	0,388564	Помилка	108,61
k ₂₃	-14,532	3,00	-4,83064	0,00015641	Критерій Фішера	
k ₁₁	34,3251	4,25	8,06777	3,25·10 ⁻⁰⁷		
k ₂₂	3,5595	4,25	0,836624	0,41441	Розраховане	1085,94
k ₃₃	1,03541	4,25	0,243363	0,810636	Табличне	2,11
Вертикальне положення (2.23)						
k ₀₀	172,57	5,20	33,1353	6,93·10 ⁻¹⁷	Сума квадратів відхилень	
k ₁₀	11,9735	2,41	4,96649	0,000117545	Модель	895689
k ₂₀	-11,455	2,41	-4,75149	0,000184888	Помилка	1778,55

Коефіцієнт	Значення	Помилка	Коефіцієнт Стьюдента	Рівень значущості	Дисперсійний аналіз	
k_{30}	52,3517	2,41	21,7149	$7,77 \cdot 10^{-14}$	Оцінка дисперсії	
k_{12}	1,47725	2,95	0,500307	0,623274	Модель	89568,9
k_{13}	-1,4772	2,95	-0,500307	0,623274	Помилка	104,62
k_{23}	-8,9412	2,95	-3,02817	0,00758478	Критерій Фішера	
k_{11}	23,2732	4,17	5,57344	$3,36305 \cdot 10^{-5}$		
k_{22}	-0,6738	4,17	-0,161369	0,873705	Розраховане	856,14
k_{33}	-17,623	4,17	-4,22042	0,000575694	Табличне	2,11

Таблиця 2.5 – Результати статистичної обробки рівнянь (2.24)–(2.26)
моделювання процесу руйнування ячменя

Коефі- цієнт	Значен- ня	По- хибка	Коефіцієнт Стьюдента	Рівень значущості	Дисперсійний аналіз	
Горизонтальне положення (2.24)						
k ₀₀	72,9259	4,89	14,9116	3,4003·10 ⁻¹¹	Сума квадратів відхилень	
k ₁₀	22,9167	2,26	10,1227	1,29439·10 ⁻⁸	Модель	381441
k ₂₀	-8,1222	2,26	-3,58774	0,00226845	Помилка	1568,3
k ₃₀	57,15	2,26	25,2443	6,4611·10 ⁻¹⁵	Оцінка дисперсії	
k ₁₂	-4,2833	2,77	-1,54484	0,140797	Модель	38144,1
k ₁₃	0,99166	2,77	0,357657	0,725002	Помилка	92,2528
k ₂₃	-14,216	2,77	-5,12742	8,40082·10 ⁻⁵	Критерій Фішера	
k ₁₁	25,3722	3,92	6,4706	5,75781·10 ⁻⁶		
k ₂₂	3,25556	3,92	0,830254	0,417903	Розраховане	413,47
k ₃₃	20,8389	3,92	5,31448	5,70597·10 ⁻⁵	Табличне	2,11
Положення на бічній поверхні (2.25)						
k ₀₀	50,137	3,32	15,0771	2,8542·10 ⁻¹¹	Сума квадратів відхилень	
k ₁₀	13,85	1,53	8,99729	7,11658·10 ⁻⁸	Модель	174051
k ₂₀	-3,8333	1,53	-2,49022	0,0234113	Помилка	725,1
k ₃₀	38,605	1,53	25,0791	7,2039·10 ⁻¹⁵	Оцінка дисперсії	
k ₁₂	-1,0666	1,88	-0,565777	0,578938	Модель	17405,1
k ₁₃	-0,7666	1,88	-0,406652	0,689337	Помилка	42,6529
k ₂₃	-5,6166	1,88	-2,97917	0,0084203	Критерій Фішера	
k ₁₁	17,3056	2,66	6,49063	5,54214·10 ⁻⁶		
k ₂₂	1,18889	2,66	0,445905	0,661293	Розраховане	408,06
k ₃₃	14,3389	2,66	5,37795	5,00872·10 ⁻⁵	Табличне	2,11
Вертикальне положення (2.26)						
k ₀₀	35,196	2,13	16,471	6,9538·10 ⁻¹²	Сума квадратів відхилень	
k ₁₀	10,506	0,98	10,621	6,35998·10 ⁻⁹	Модель	84859,3
k ₂₀	-3,589	0,98	-3,628	0,0021	Помилка	299,403

Коефі- цієнт	Значен- ня	По- хибка	Коефіцієнт Стюдента	Рівень значущості	Дисперсійний аналіз	
k_{30}	27	0,98	27,296	$1,7644 \cdot 10^{-15}$	Оцінка дисперсії	
k_{12}	-1,567	1,21	-1,293	0,2132	Модель	8485,93
k_{13}	-0,317	1,21	-0,261	0,7969	Помилка	17,612
k_{23}	-5,642	1,21	-4,657	0,0002	Критерій Фішера	
k_{11}	12,494	1,71	7,2927	$1,25697 \cdot 10^{-6}$		
k_{22}	-0,156	1,71	-0,091	0,9287	Розраховане	481,83
k_{33}	9,9111	1,71	5,7849	$2 \cdot 10^{-5}$	Табличне	2,11

Після відсіювання незначущих факторів за t-критерієм Стюдента ($t_{0,05}(23) = 2,07$) методом статистичного аналізу було отримано остаточні рівняння регресії, які найбільш повно відображають вплив основних параметрів на міцність зерна.

У зв'язку з тим, що розраховане значення критерію Фішера перевищує табличне при заданому рівні значущості, це свідчить про статистичну значущість отриманої регресійної моделі, а отже, рівняння (2.18)–(2.26) є адекватними результатам моделювання і можуть бути використані для аналізу та прогнозування поведінки досліджуваного об'єкта в межах області планування чисельного експерименту.

В розкодованому вигляді отримали наступні рівняння регресії.

Для кукурудзи:

– у горизонтальному положенні:

$$F_g^c = 1392,43 - 38,416E_p + 0,229876E_p^2 - 853,944W_p + 27,0222E_p W_p + 155,389W_p^2 - 453,889v; \quad (2.27)$$

– на бічній поверхні:

$$F_l^c = 955,501 - 19,3519E_p - 743,557W_p + 18,1E_p W_p + 159,056W_p^2 - 231,111v; \quad (2.28)$$

– у вертикальному положенні:

$$F_v^c = 444,042 - 16,379E_p + 0,17284E_p^2 - 121,583W_p + 9,03887E_p W_p. \quad (2.29)$$

Для пшениці:

– у горизонтальному положенні:

$$F_g^w = 99,8866 - 7,1989E_p + 0,174596E_p^2 + 56,5539W_p + 17,08W_p^2 + 219,194v - 109,597W_p v; \quad (2.30)$$

– на бічній поверхні:

$$F_l^w = 63,5671 - 6,29059E_p + 0,152556E_p^2 + 115,172W_p + 150,476v - 145,327W_p v; \quad (2.31)$$

– у вертикальному положенні:

$$F_v^w = 16,3561 - 4,37359E_p + 0,103436E_p^2 + 158,61W_p - 17,6233W_p^2 + 64,273v - 89,4125W_p v. \quad (2.32)$$

Для ячменю:

– у горизонтальному положенні:

$$F_g^b = -6,97939 - 4,11049E_p + 0,112765E_p^2 + 30,6612W_p + 20,8389W_p^2 + 203,112v - 142,167W_p v; \quad (2.33)$$

– на бічній поверхні:

$$F_l^b = 25,6691 - 2,92236E_p + 0,0769138E_p^2 + 3,71668W_p + 14,3389W_p^2 + 74,0001v - 56,1667W_p v; \quad (2.34)$$

– у вертикальному положенні:

$$F_v^b = 7,26027 - 2,07616E_p + 0,0555307E_p^2 + 9,92224W_p + 9,91111W_p^2 + 76,9445v - 56,4167W_p v. \quad (2.35)$$

Графічна інтерпретація залежностей (2.27)–(2.35) представлена на рис. 2.5–2.7.

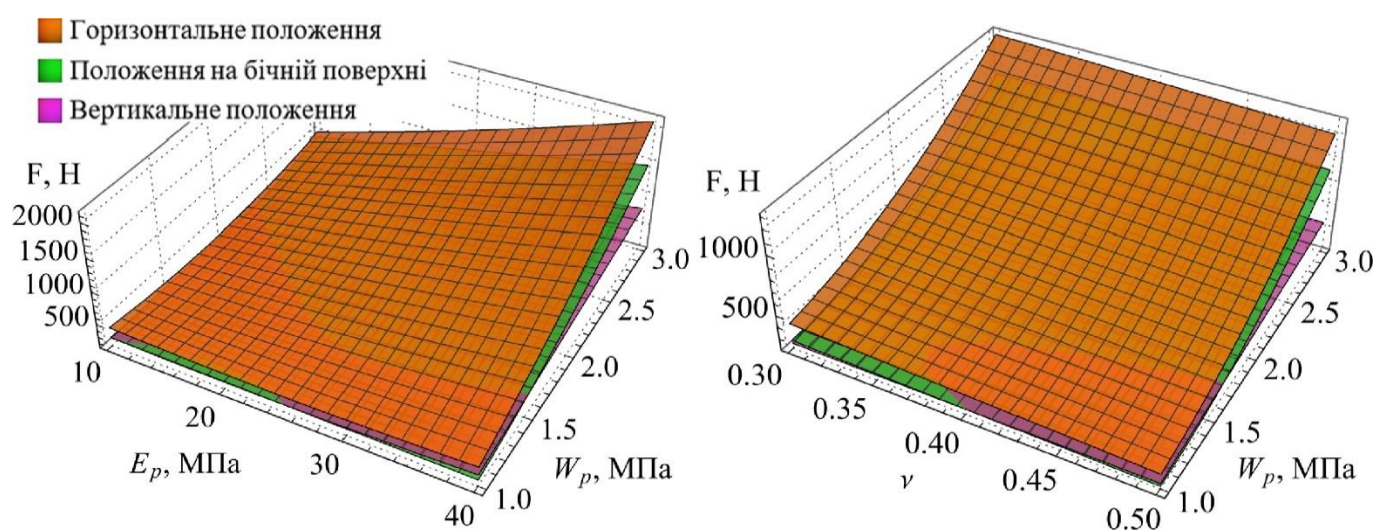


Рисунок 2.5 – Залежність сили руйнування зерна кукурудзи при стиску від коефіцієнта Пуассона ν , модуля Юнга E_p та напруги розтягу та зсуву W_p при її різному положенні

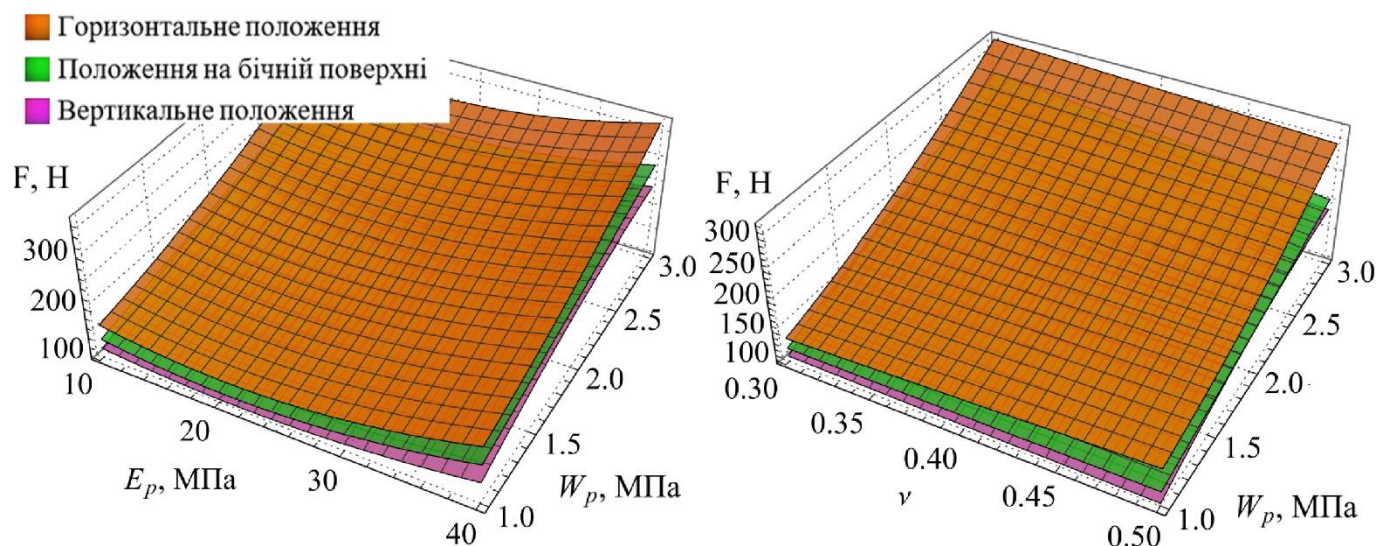


Рисунок 2.6 – Залежність сили руйнування зерна пшениці при стиску від коефіцієнта Пуассона ν , модуля Юнга E_p та напруги розтягу та зсуву W_p при її різному положенні

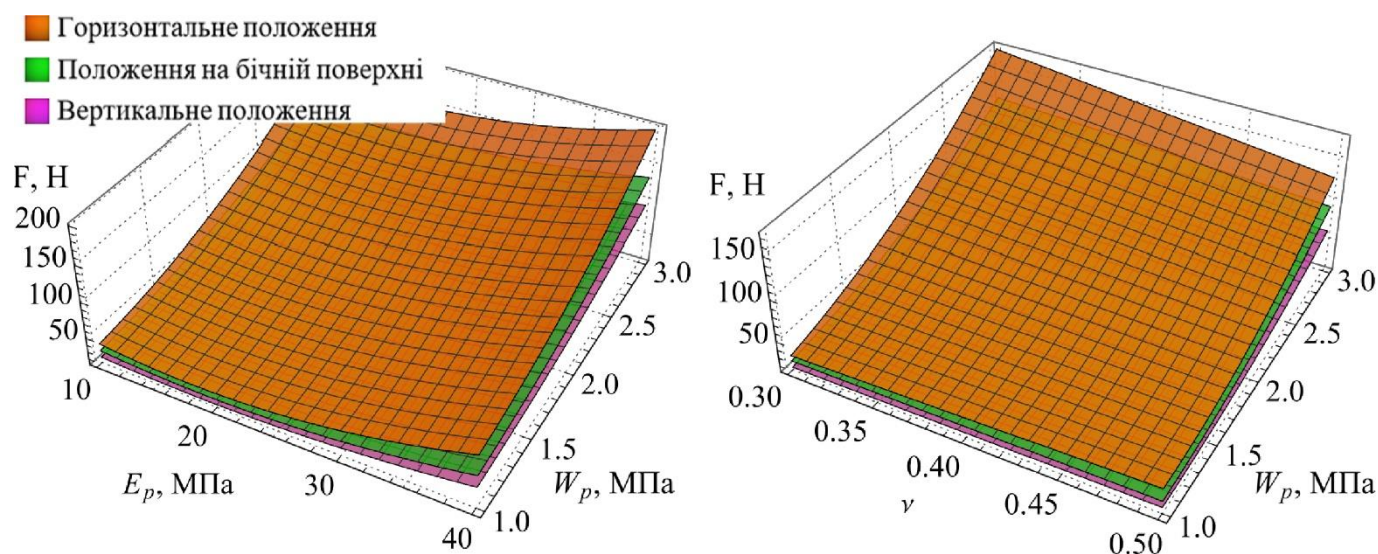


Рисунок 2.7 – Залежність сили руйнування зерна ячменя при стиску від коефіцієнта Пуассона ν , модуля Юнга E_p та напруги розтягу та зсуву W_p при її різному положенні

Аналіз отриманих графіків (рис. 2.5–2.7) свідчить про наявність чіткої залежності сили руйнування зерна від фізико-механічних характеристик матеріалу оболонки та положення зернини відносно напрямку прикладання навантаження. Для усіх трьох культур (кукурудзи, пшениці та ячменю) спостерігається закономірне зростання сили руйнування зі збільшенням модуля Юнга (E_p), що узгоджується з

теоретичними положеннями механіки матеріалів: чим більша жорсткість оболонки, тим вищий опір деформації [201]. З фізичної точки зору, процес руйнування зерна під навантаженням є результатом перевищення меж міцності його оболонки й внутрішніх структур у зонах максимальних напружень, що виникають при контакті з навантажувальним елементом. При цьому модуль Юнга визначає здатність матеріалу опиратися деформації: чим вища його величина, тим менше зернина зазнає пружної деформації до моменту настання критичного стану, і, відповідно, потрібно більше зусилля для її руйнування.

Водночас, вплив коефіцієнта Пуассона (ν) має менш однозначний характер. У межах розрахованого інтервалу значень коефіцієнта Пуассона можна відзначити слабе зростання сили руйнування при збільшенні, однак ця залежність суттєво варіюється залежно від просторового положення зернини. Найбільш помітний вплив спостерігався при вертикальному розташуванні зерна, що пов'язано з більш активним перерозподілом нормальних і тангенціальних напружень у зоні контакту. З фізичної точки зору, коефіцієнт Пуассона характеризує трансверсальну деформацію – тобто здатність матеріалу «розширюватись» або «стискатись» у перпендикулярних до навантаження напрямках. Це, у свою чергу, впливає на розподіл контактного тиску та форму зони локального руйнування.

Гранична напруга розтягу та зсуву (W_p), як і очікувалося, прямо пропорційно впливає на силу руйнування. Це підтверджує коректність прийнятої контактної моделі та демонструє, що підвищення міцнісних характеристик зерна приводить до зростання навантаження, необхідного для ініціювання руйнування. З точки зору механіки руйнування, гранична напруга розтягу або зсуву визначає критичне значення напруження, при досягненні якого в матеріалі зароджується і поширюється тріщина.

Також спостерігаємо різницю характеру змін для кожного з трьох положень зернини: вертикального, горизонтального та бокового. Найвищі значення сили руйнування зафіксовані при навантаженні зерна у горизонтальній орієнтації, що свідчить про більшу несучу здатність структури в цьому положенні. Натомість у боковому положенні сила руйнування суттєво знижується, особливо для ячменю, що обумовлюється структурною анізотропією оболонки та внутрішніх шарів. З фізичної

точки зору це пояснюється нерівномірним розподілом матеріалу та напрямком волокон або шарів, які формують зернину, що впливають на передачу навантаження та зони концентрації напружень.

Таким чином, результати чисельного моделювання підтверджують критичну роль фізико-механічних властивостей та просторової орієнтації зернини у процесі руйнування. Це має важливе значення при подальшій оптимізації параметрів подрібнення.

Отримані результати при лабораторних дослідженнях (розділ 4.1) є важливим етапом для уточнення вхідних параметрів чисельного моделювання процесів руйнування зерна. Було проведено співставлення сили руйнування зернин кукурудзи, отриманої в результаті віртуального моделювання, з фактичними даними лабораторного експерименту. Для цього у програмному середовищі MS Excel здійснено підбір параметрів фізико-механічних властивостей зерна (модуль Юнга, коефіцієнт Пуассона, гранична напруга), за яких значення зусиль, розрахованих у моделі, узгоджуються з емпіричними даними. Для цього використовувалися отримані рівняння регресії (2.27)–(2.35).

Таким чином було визначено наступні параметри, що найкраще відповідатимуть зерну досліджуваних сортів. Результати представлені в таблиці 2.6.

Таблиця 2.6 – Уточнені фізико-механічні характеристики зерна для моделювання

Матеріал	Коефіцієнт Пуассона ν	Модуль Юнга E_p , МПа	Напруга розтягу та зсуву W_p , МПа
Гібрид кукурудзи П8816	$0,48 \pm 0,02$	$10,1 \pm 2,2$	$2,4 \pm 0,1$
Пшениця сорту «Патрас»	$0,50 \pm 0,03$	$21,2 \pm 3,1$	$2,2 \pm 0,1$
Ячмінь сорту «Снігова Королева»	$0,32 \pm 0,02$	$39,2 \pm 3,8$	$3,0 \pm 0,2$

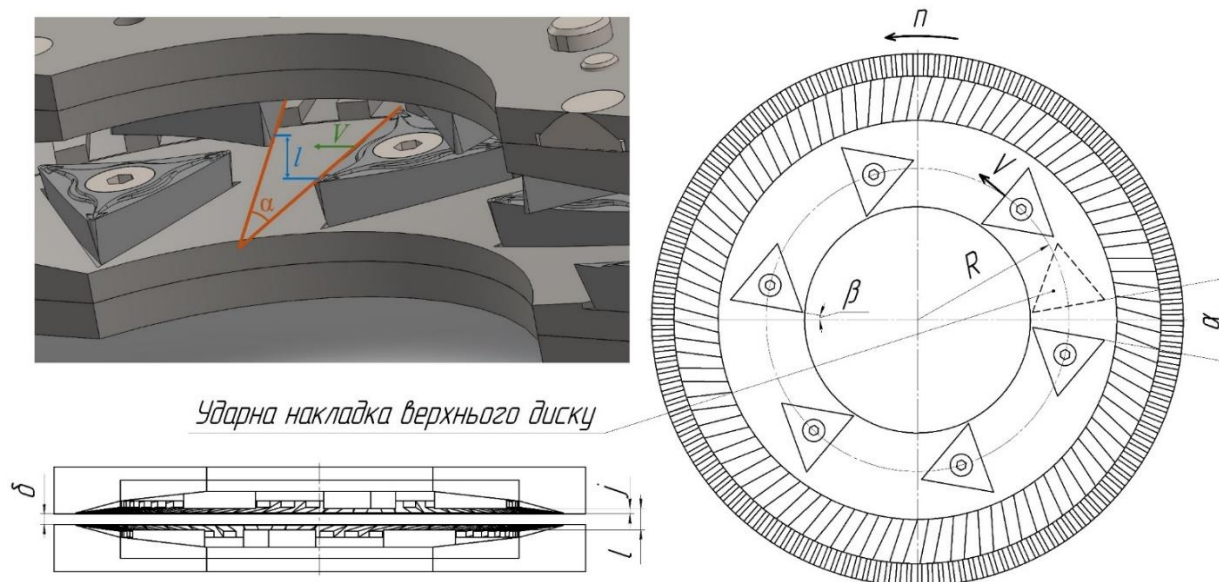
Уточнення параметрів моделі дозволяє досягти високого рівня відповідності між чисельними та експериментальними результатами, що підвищує достовірність подальших віртуальних досліджень і може бути використано при оптимізації конструкції робочих органів подрібнювачів.

2.4 Симуляція процесу руйнування зерна ударним різанням

Враховуючи особливості конструктивної конфігурації запропонованого нового робочого органу дискового подрібнювача (розділ 1.7), виникла необхідність дослідити вплив додаткових факторів на силу руйнування зерна при його ударному різанні. Зокрема, оскільки ключову роль у процесі подрібнення виконують ударні накладки, доцільне вивчення їх впливу на руйнування зернового матеріалу.

Для цього в рамках чисельного експерименту було обрано три варійовані фактори, що найбільш повно характеризують кінематику та геометрію взаємодії зерна з ударними елементами удосконаленого дискового подрібнювача (рис. 2.8): відстань між ударними накладками l (мм); кут між накладками α ($^{\circ}$); лінійна швидкість руху накладки V (м/с).

Дослідження здійснювали відповідно до плану трьохфакторного повного факторного експерименту з трьома рівнями варіювання кожного фактору. Геометричне та кінематичне відображення обраних параметрів наведено на рисунку 2.8, а їх комбінації – у матриці планування експерименту (табл. 2.7). Діапазони варіювання факторів були обрані з наступних міркувань: відстань між ударними накладками – у відповідності до геометричних розмірів зернин, щоб забезпечити можливість контакту з окремими зернинами без надлишкового скупчення або прослизання; кут між ударними накладками – з урахуванням забезпечення оптимального режиму подрібнення та рівномірного розподілу ударних навантажень по траєкторії руху; швидкість руху ударної накладки – згідно частот обертання диска дискового подрібнювача (1500 об/хв, 2250 об/хв, 3000 об/хв) і радіуса розташування накладки (30 мм), що визначає кінетичну енергію удару, яка передається зернині та безпосередньо впливає на ефективність руйнування її оболонки.



l – відстань між ударними накладками; α – кут між ударними накладками;
 V – швидкість руху ударної накладки; n – частота обертання диска; R – радіус встановлення накладки; δ – модульний зазор між дисками; l – відстань від накладки до краю диска; β – кут встановлення ударних накладок

Рисунок 2.8 – Схема обраних факторів для чисельного моделювання

Таблиця 2.7 – Рівні та інтервали варіювання факторів

Показник	Відстань між ударними накладками l , мм	Кут між ударними накладками α , °	Швидкість руху ударної накладки V , м/с
	x_4	x_5	x_6
Верхній рівень (+1)	2	60	4,72
Основний рівень (0)	1,5	35	7,07
Нижній рівень (-1)	1	10	9,42
Інтервал варіювання	0,5	25	2,35

Методика чисельного моделювання у даному дослідженні реалізована за підходом, аналогічним до викладеного в розділі 2.3, із використанням методу дискретних елементів (DEM), фізико-математичний апарат якого наведений в розділі 2.1. Конструктивно-механічна модель взаємодії зерна з ударними елементами

була адаптована під конфігурацію запропонованого робочого органу, з урахуванням нових варійованих факторів.

Параметри симуляції DEM, використані для цього етапу дослідження, наведено в таблиці 2.1 і 2.6. Їх значення було уточнено на основі лабораторних досліджень і попередньої симуляції. Це забезпечило більш точну відповідність моделі реальним умовам подрібнення та дозволило підвищити достовірність чисельного прогнозування сили руйнування.

На рисунку 2.9 наведено кілька прикладів розвитку процесу руйнування зернини ударним різанням, зафіксованих під час чисельного моделювання в середовищі Simcenter STAR-CCM+. Скріншоти ілюструють різні варіанти положення зернини, їх моделей та досліджуваних параметрів.

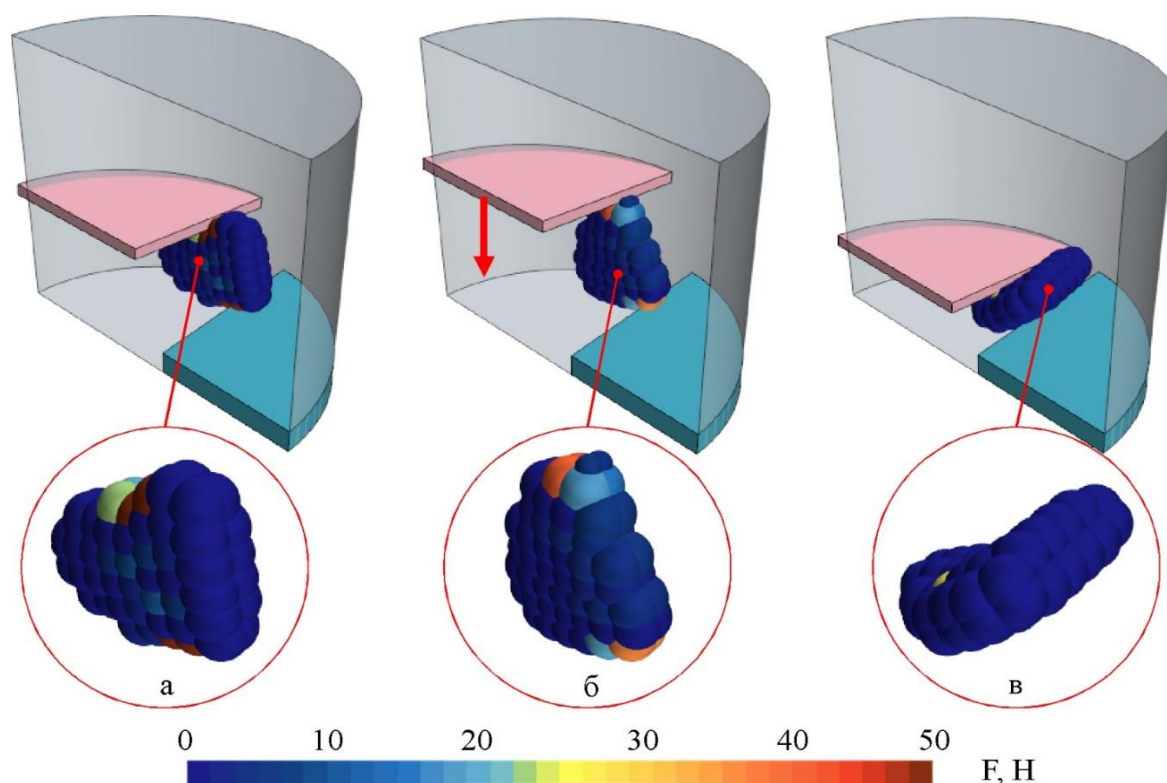


Рисунок 2.9 – Приклад симуляції руйнування зернини кукурудзи ударним різанням у положенні на бічній поверхні (а), вертикальному (б) та горизонтальному (в)

У середовищі Simcenter STAR-CCM+ на основі розроблених DEM-моделей зернин було проведено серію віртуальних досліджень процесу руйнування ударним

різанням, за якими визначалась залежність зусилля від деформації зернини. Приклад такої залежності представлений на рис. 2.10. Перший максимум залежності і будемо вважати силою руйнування зернини ударним різанням F .

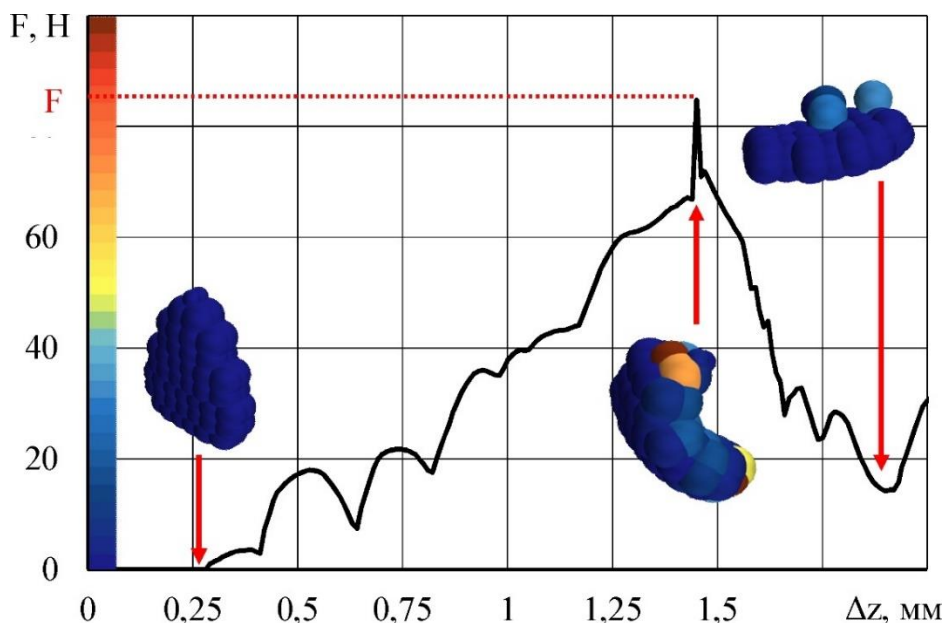


Рисунок 2.10 – Приклад динаміки зміни зусилля при руйнуванні зернини кукурудзи ударним різанням у вертикальному положенні

Отримані в результаті віртуального повнофакторного експерименту дані (додаток Г) було оброблено з використанням хмарного обчислювального середовища Wolfram Cloud за методикою, яка наведена в розділі 3.7, що дало змогу реалізувати ефективну математичну обробку великого масиву симуляційних результатів.

У результаті побудовано рівняння регресії в закодованому вигляді, які описують залежність сили руйнування зернини кукурудзи ударним різанням від варійованих факторів.

Для кукурудзи:

– у горизонтальному положенні:

$$F_g^c = 209,989 - 232,264x_4 + 219,95x_4^2 - 65,3294x_5 + 73,8124x_4x_5 + 7,75579x_5^2 - 1,87146x_6 + 13,9569x_4x_6 + 23,8316x_5x_6 + 5,44069x_6^2; \quad (2.36)$$

– на бічній поверхні:

$$F_l^c = 141,096 - 89,5171x_4 + 24,9607x_4^2 - 27,6001x_5 + 25,7416x_4x_5 + 2,95206x_5^2 - 3,56539x_6 + 0,501917x_4x_6 - 0,777583x_5x_6 - 3,61328x_6^2; \quad (2.37)$$

– у вертикальному положенні:

$$F_v^c = 79,749 - 60,1056x_4 + 6,13889x_4^2 - 2,74944x_5 + 2,12583x_4x_5 + 0,460556x_5^2 + 8,21611x_6 - 11,1592x_4x_6 - 0,272833x_5x_6 + 6,13256x_6^2. \quad (2.38)$$

Для пшениці:

– у горизонтальному положенні:

$$F_g^w = 62,3187 - 30,7681x_4 - 18,068x_4^2 - 9,74364x_5 + 8,2212x_4x_5 + 10,9125x_5^2 - 2,35242x_6 - 2,11423x_4x_6 - 1,2155x_5x_6 + 1,99882x_6^2; \quad (2.39)$$

– на бічній поверхні:

$$F_l^w = 83,6208 - 47,5272x_4 - 7,3224x_4^2 - 9,5472x_5 + 6,8256x_4x_5 - 2,1168x_5^2 - 4,9104x_6 + 5,5944x_4x_6 + 3,0996x_5x_6 + 7,2576x_6^2; \quad (2.40)$$

– у вертикальному положенні:

$$F_v^w = 34,8533 - 25,2933x_4 + 1,9942x_4^2 - 1,3216x_5 + 0,16815x_4x_5 + 0,0472x_5^2 + 3,2155x_6 - 5,1507x_4x_6 + 0,4956x_5x_6 + 1,2685x_6^2. \quad (2.41)$$

Для ячменю:

– у горизонтальному положенні:

$$F_g^b = 32,8679 - 17,5048x_4 - 9,2326x_4^2 - 5,88618x_5 + 5,18311x_4x_5 + 6,74897x_5^2 - 0,840308x_6 - 1,82693x_4x_6 - 1,3358x_5x_6 + 2,06412x_6^2; \quad (2.42)$$

– на бічній поверхні:

$$F_l^b = 48,9114 - 28,3361x_4 - 3,46855x_4^2 - 5,5468x_5 + 3,95656x_4x_5 - 1,22944x_5^2 - 2,89797x_6 + 3,16033x_4x_6 + 1,47628x_5x_6 + 4,28699x_6^2; \quad (2.43)$$

– у вертикальному положенні:

$$F_v^b = 23,6923 - 17,351x_4 + 1,43087x_4^2 - 0,994703x_5 + 0,124273x_4x_5 + 0,111733x_5^2 + 2,05543x_6 - 3,4018x_4x_6 + 0,413342x_5x_6 + 1,23203x_6^2. \quad (2.44)$$

Статистична обробка рівнянь (2.36)–(2.44) приведена в таблицях 2.8–2.10.

Таблиця 2.8 – Результати статистичної обробки рівнянь (2.36)–(2.38) моделювання процесу руйнування кукурудзи ударним різанням

Коефі- цієнт	Значен- ня	По- хибка	Коефіцієнт Стьюдента	Рівень значущості	Дисперсійний аналіз	
Горизонтальне положення (2.36)						
k ₀₀	209,989	32,74	6,41348	6,42193·10 ⁻⁶	Сума квадратів відхилень	
k ₄₀	-232,26	15,15	-15,3244	2,2038·10 ⁻¹¹	Модель	5,01862·10 ⁶
k ₅₀	-65,329	15,15	-4,31031	0,000474331	Помилка	70294,4
k ₆₀	-1,8714	15,15	-0,123475	0,903179	Оцінка дисперсії	
k ₄₅	73,8124	18,56	3,97634	0,000975979	Модель	501862
k ₄₆	13,9569	18,56	0,751869	0,462413	Помилка	4134,97
k ₅₆	23,8316	18,56	1,28383	0,216424	Критерій Фішера	
k ₄₄	219,95	26,25	8,37844	1,93435·10 ⁻⁷		
k ₅₅	7,75579	26,25	0,295437	0,771238	Розраховане	121,37
k ₆₆	5,44069	26,25	0,20725	0,838277	Табличне	2,11
Положення на бічній поверхні (2.37)						
k ₀₀	141,096	8,12	17,3642	2,9727·10 ⁻¹²	Сума квадратів відхилень	
k ₄₀	-89,517	3,76	-23,7985	1,7154·10 ⁻¹⁴	Модель	838046
k ₅₀	-27,600	3,76	-7,33758	1,15983·10 ⁻⁶	Помилка	4329,48
k ₆₀	-3,5653	3,76	-0,947872	0,356475	Оцінка дисперсії	
k ₄₅	25,7416	4,60	5,58769	3,2673·10 ⁻⁰⁵	Модель	83804,6
k ₄₆	0,50191	4,60	0,10895	0,914518	Помилка	254,675
k ₅₆	-0,7775	4,60	-0,168789	0,867955	Критерій Фішера	
k ₄₄	24,9607	6,51	3,83124	0,00133703		
k ₅₅	2,95206	6,51	0,453113	0,656197	Розраховане	329,06
k ₆₆	-3,6132	6,51	-0,554605	0,586388	Табличне	2,11
Вертикальне положення (2.38)						
k ₀₀	79,749	3,59	22,1866	5,4558·10 ⁻¹⁴	Сума квадратів відхилень	
k ₄₀	-60,105	1,66	-36,1229	1,6276·10 ⁻¹⁷	Модель	278598
k ₅₀	-2,7494	1,66	-1,65239	0,116803	Помилка	847,198
k ₆₀	8,21611	1,66	4,93781	0,000124831	Оцінка дисперсії	
k ₄₅	2,12583	2,03	1,04316	0,311481	Модель	27859,8
k ₄₆	-11,159	2,03	-5,47589	0,000041002	Помилка	49,8352
k ₅₆	-0,2728	2,03	-0,133881	0,895069	Критерій Фішера	
k ₄₄	6,13889	2,88	2,13009	0,0480697		
k ₅₅	0,46055	2,88	0,159805	0,874918	Розраховане	559,04
k ₆₆	6,13256	2,88	2,12789	0,0482756	Табличне	2,11

Таблиця 2.9 – Результати статистичної обробки рівнянь (2.39)–(2.41) моделювання процесу руйнування пшениці ударним різанням

Коефі- цієнт	Значен- ня	По- хибка	Коефіцієнт Стюдента	Рівень значущості	Дисперсійний аналіз	
Горизонтальне положення (2.39)						
k ₀₀	62,318	7,73	8,05372	3.33166·10 ⁻⁷	Сума квадратів відхилень	
k ₄₀	-30,768	3,58	-8,58978	1.36757·10 ⁻⁷	Модель	116036
k ₅₀	-9,7436	3,58	-2,72021	0,0145476	Помилка	3926,08
k ₆₀	-2,3524	3,58	-0,656745	0,520137	Оцінка дисперсії	
k ₄₅	8,2212	4,38	1,87401	0,0782227	Модель	11603,6
k ₄₆	-2,1142	4,38	-0,481935	0,635998	Помилка	230,946
k ₅₆	-1,2155	4,38	-0,277071	0,785067	Критерій Фішера	
k ₄₄	-18,068	6,20	-2,91226	0,00970696		
k ₅₅	10,9125	6,20	1,75891	0,0965775	Розраховане	50,24
k ₆₆	1,99882	6,20	0,322177	0,751247	Табличне	2,11
Положення на бічній поверхні (2.40)						
k ₀₀	83,6208	6,48	12,9039	3.2872·10 ⁻¹⁰	Сума квадратів відхилень	
k ₄₀	-47,527	2,99	-15,8435	1.2955·10 ⁻¹¹	Модель	226734
k ₅₀	-9,5472	2,99	-3,18263	0,00544734	Помилка	2753,6
k ₆₀	-4,9104	2,99	-1,63692	0,120024	Оцінка дисперсії	
k ₄₅	6,8256	3,67	1,85783	0,080601	Модель	22673,4
k ₄₆	5,5944	3,67	1,52271	0,146215	Помилка	161,977
k ₅₆	3,0996	3,67	0,843665	0,410571	Критерій Фішера	
k ₄₄	-7,3224	5,19	-1,4093	0,176778		
k ₅₅	-2,1168	5,19	-0,407408	0,688793	Розраховане	139,98
k ₆₆	7,2576	5,19	1,39683	0,180435	Табличне	2,11
Вертикальне положення (2.41)						
k ₀₀	34,8533	1,79	19,4427	4.7472·10 ⁻¹³	Сума квадратів відхилень	
k ₄₀	-25,293	0,82	-30,4804	2.8013·10 ⁻¹⁶	Модель	49171
k ₅₀	-1,3216	0,82	-1,59263	0,129665	Помилка	210,712
k ₆₀	3,2155	0,82	3,87493	0,00121607	Оцінка дисперсії	
k ₄₅	0,16815	1,01	0,16545	0,870541	Модель	4917,1
k ₄₆	-5,1507	1,01	-5,068	9,5070·10 ⁻⁰⁵	Помилка	12,3949
k ₅₆	0,4956	1,01	0,487642	0,632032	Критерій Фішера	
k ₄₄	1,9942	1,43	1,38747	0,183219		
k ₅₅	0,0472	1,43	0,0328395	0,974185	Розраховане	396,7
k ₆₆	1,2685	1,43	0,882562	0,389782	Табличне	2,11

Таблиця 2.10 – Результати статистичної обробки рівнянь (2.42)–(2.43) моделювання процесу руйнування ячменю ударним різанням

Коефі- цієнт	Значен- ня	По- хибка	Коефіцієнт Стюдента	Рівень значущості	Дисперсійний аналіз	
Горизонтальне положення (2.42)						
k ₀₀	32,8679	4,95	6,63176	4,24168·10 ⁻⁶	Сума квадратів відхилень	
k ₄₀	-17,504	2,29	-7,62989	6,91391·10 ⁻⁷	Модель	36019,9
k ₅₀	-5,8861	2,29	-2,56563	0,020054	Помилка	1610,65
k ₆₀	-0,8403	2,29	-0,366267	0,718684	Оцінка дисперсії	
k ₄₅	5,18311	2,80	1,84461	0,0825911	Модель	3601,99
k ₄₆	-1,8269	2,80	-0,650183	0,524264	Помилка	94,7442
k ₅₆	-1,3358	2,80	-0,475397	0,640555	Критерій Фішера	
k ₄₄	-9,2326	3,97	-2,3234	0,0328155		
k ₅₅	6,74897	3,97	1,69839	0,107661	Розраховане	38,02
k ₆₆	2,06412	3,97	0,519439	0,610152	Табличне	2,11
Положення на бічній поверхні (2.43)						
k ₀₀	48,9114	3,74	13,0705	2,6937·10 ⁻¹⁰	Сума квадратів відхилень	
k ₄₀	-28,336	1,73	-16,3578	7,7691·10 ⁻¹²	Модель	79554,4
k ₅₀	-5,5468	1,73	-3,20204	0,00522456	Помилка	918,231
k ₆₀	-2,8979	1,73	-1,67293	0,112641	Оцінка дисперсії	
k ₄₅	3,95656	2,12	1,86491	0,0795526	Модель	7955,44
k ₄₆	3,16033	2,12	1,48961	0,154646	Помилка	54,0136
k ₅₆	1,47628	2,12	0,695839	0,495933	Критерій Фішера	
k ₄₄	-3,4685	3,00	-1,15604	0,263655		
k ₅₅	-1,2294	3,00	-0,409762	0,687098	Розраховане	147,28
k ₆₆	4,28699	3,00	1,42882	0,171174	Табличне	2,11
Вертикальне положення (2.44)						
k ₀₀	23,6923	1,23	19,1156	6,2587·10 ⁻¹³	Сума квадратів відхилень	
k ₄₀	-17,351	0,57	-30,242	3,1942·10 ⁻¹⁶	Модель	23290,2
k ₅₀	-0,9947	0,57	-1,73372	0,101065	Помилка	100,728
k ₆₀	2,05543	0,57	3,58251	0,00229437	Оцінка дисперсії	
k ₄₅	0,12427	0,70	0,176855	0,861712	Модель	2329,02
k ₄₆	-3,4018	0,70	-4,84115	0,00015298	Помилка	5,9252
k ₅₆	0,41334	0,70	0,588232	0,56411	Критерій Фішера	
k ₄₄	1,43087	0,99	1,43987	0,168065		
k ₅₅	0,11173	0,99	0,112436	0,911794	Розраховане	393,07
k ₆₆	1,23203	0,993	1,23978	0,231897	Табличне	2,11

Оскільки розраховане значення критерію Фішера перевищує табличне при заданому рівні значущості, це вказує на статистичну значущість побудованої

регресійної моделі. Таким чином, рівняння (2.36)–(2.44) можна вважати адекватними результатам моделювання, що дає підстави використовувати їх для аналізу та прогнозування поведінки об'єкта дослідження в межах області планування чисельного експерименту. В розкодованому вигляді без урахування незначущих коефіцієнтів за t-критерієм Стьюдента ($t_{0,05}(23) = 2,07$) рівняння мають наступний вигляд.

Для кукурудзи:

– у горизонтальному положенні:

$$F_g^c = 1472,26 - 337,334l - 42,7824\alpha + 5,90499l\alpha + 0,35192\alpha^2; \quad (2.45)$$

– на бічній поверхні:

$$F_l^c = 506,258 - 127,277l - 9,46527\alpha + 2,05933l\alpha + 0,0399371\alpha^2; \quad (2.46)$$

– у вертикальному положенні:

$$F_v^c = 159,716 - 5,55777V + 1,11047V^2 - 1,74888\alpha - 0,189944V\alpha + 0,00982222\alpha^2. \quad (2.47)$$

Для пшениці:

– у горизонтальному положенні:

$$F_g^w = 133,741 - 42,5066l - 0,193652\alpha + 0,657696l\alpha - 0,0289088\alpha^2; \quad (2.48)$$

– на бічній поверхні:

$$F_l^w = 178,8 - 19,0944l - 1,90109\alpha; \quad (2.49)$$

– у вертикальному положенні:

$$F_v^w = 38,8957 + 4,4368V - 0,391895\alpha - 0,0876715V\alpha. \quad (2.50)$$

Для ячменю:

– у горизонтальному положенні:

$$F_g^b = 56,9373 - 11,7724l + 0,333859\alpha - 0,0147722\alpha^2; \quad (2.51)$$

– на бічній поверхні:

$$F_l^b = 105,222 - 11,0936l - 1,13344\alpha; \quad (2.52)$$

– у вертикальному положенні:

$$F_v^b = 27,4718 + 2,90126V - 0,284666\alpha - 0,057903V\alpha. \quad (2.53)$$

Графічна інтерпретація залежностей (2.45)–(2.53) наведена на рис. 2.11–2.13.

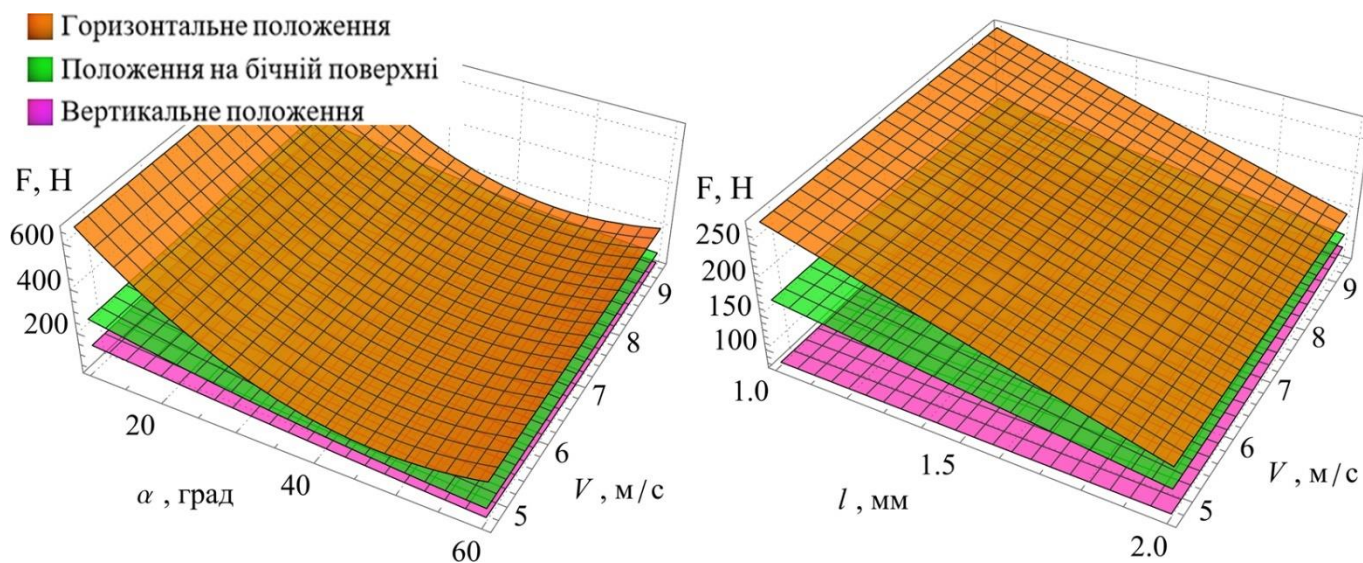


Рисунок 2.11 – Залежність сили руйнування зерна кукурудзи при ударному різанні від відстані між ударними накладками l , кута між накладками α та лінійної швидкості руху накладки V при її різному положенні

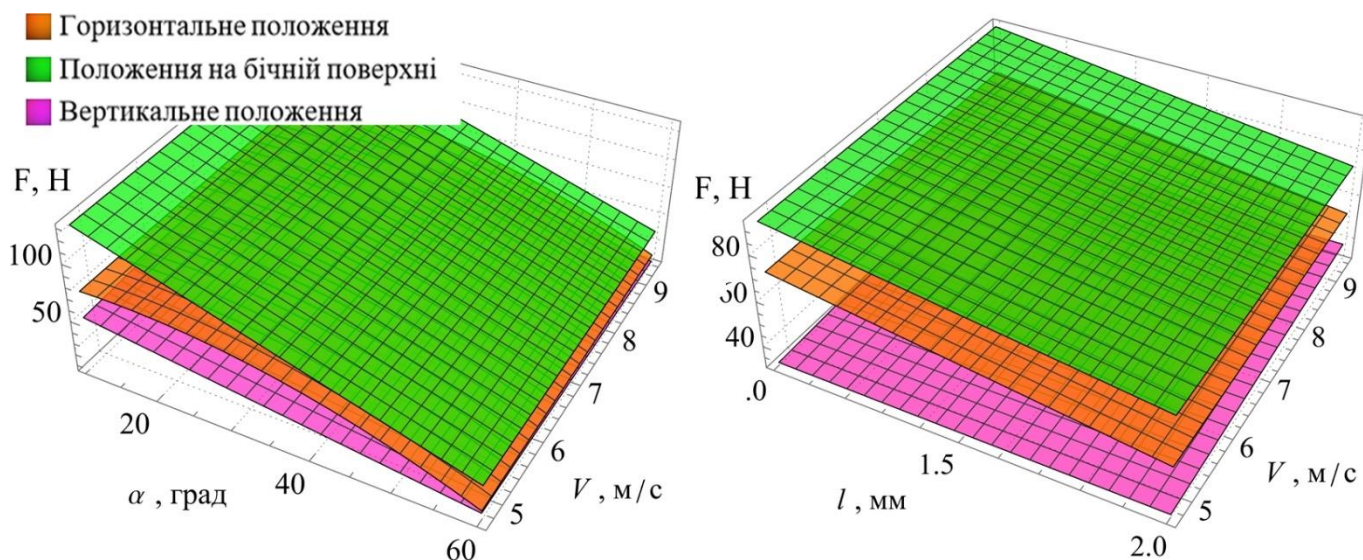


Рисунок 2.12 – Залежність сили руйнування зерна пшениці при ударному різанні від відстані між ударними накладками l , кута між накладками α та лінійної швидкості руху накладки V при її різному положенні

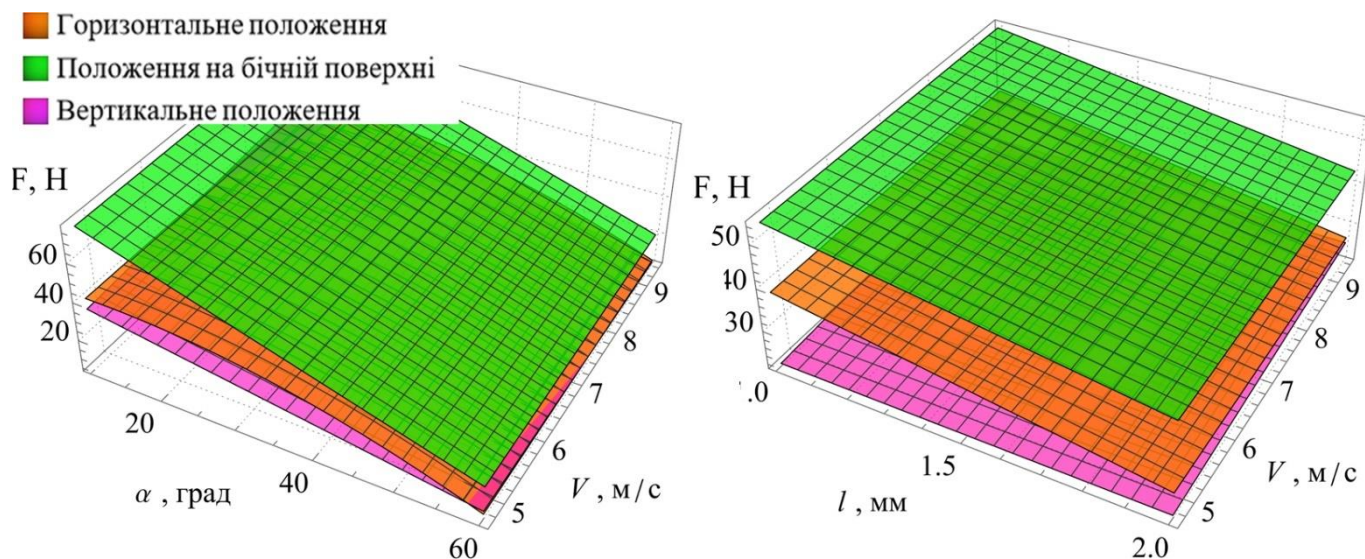


Рисунок 2.13 – Залежність сили руйнування зерна ячменю при ударному різанні від відстані між ударними накладками l , кута між накладками α та лінійної швидкості руху накладки V при її різному положенні

Аналіз отриманих результатів віртуального моделювання дозволив визначити ступінь впливу кожного з досліджуваних факторів на силу руйнування зерна кукурудзи. Найбільш впливовим чинником виявився кут між ударними накладками. Спостерігається чітка зворотна залежність: зі збільшенням кута відбувається зменшення сили, необхідної для руйнування зернини. Це пояснюється зменшенням компоненти нормального навантаження, яка передається на оболонку зерна при збільшенні кута взаємного розташування накладок. З фізичної точки зору, при малому куті ударні накладки спрямовані більш фронтально до зернини, забезпечуючи вищий рівень концентрованого механічного впливу у напрямку, перпендикулярному до оболонки. Це призводить до швидшого досягнення граничного стану напружень у зоні контакту та ініціювання руйнування.

Відстань між ударними елементами має помірний вплив порівняно з кутом. Встановлено, що зменшення відстані сприяє зростанню сили руйнування зерна. Це зумовлено тим, що при меншій відстані ударні накладки створюють сприятливіші умови для ефективного стискування оболонки, що пришвидшує розвиток локальних

деформацій і формування тріщини. З фізичної точки зору, при зменшенні відстані між елементами зернина зазнає впливу двох майже одночасних ударів у ближчих зонах, що сприяє інтенсивнішому розподілу напружень у поперечному перерізі оболонки, прискорюючи процес накопичення пластичних деформацій та запуску механізмів зминання. Найбільш виражений ефект спостерігається у горизонтальному та бічному положеннях, де механізм руйнування реалізується переважно шляхом локального зминання та зсуву. У вертикальному положенні вплив відстані є менш суттєвим, оскільки навантаження діє вздовж найміцнішої геометричної осі.

Швидкість ударної накладки виявилася найменш впливовим фактором серед досліджуваних. Водночас, зі зростанням швидкості спостерігається тенденція до підвищення сили руйнування, особливо у вертикальному положенні зернини, де удар передається вздовж поздовжньої осі. У таких умовах кінетична енергія, яку передає накладка, ефективно концентрується в центральній частині зерна, сприяючи утворенню внутрішніх мікротріщин та підвищенню рівня напружень у структурі. З фізичної точки зору, швидкість впливає на імпульс та енергію удару: чим вища швидкість, тим більша миттєва сила взаємодії, що призводить до швидшого перевищення межі пружності матеріалу оболонки. Проте через короткий час взаємодії і швидко релаксацію напружень, ефект не є лінійним і проявляється лише в окремих просторових положеннях зернини, де ударна хвиля ефективніше передається вглиб структури.

Для комплексної оцінки було введено інтегральний критерій ефективності:

$$\Theta(l, \alpha, V) = \frac{F_x(l, \alpha, V) - F_{x\min}}{F_{x\max} - F_{x\min}} \cdot \frac{F_y(l, \alpha, V) - F_{y\min}}{F_{y\max} - F_{y\min}} \cdot \frac{F_z(l, \alpha, V) - F_{z\min}}{F_{z\max} - F_{z\min}} \times \\ \times \frac{V - V_{\min}}{V_{\max} - V_{\min}} \cdot \frac{l_{\max} - l}{l_{\max} - l_{\min}} \rightarrow \min, \quad (2.54)$$

згідно якого повинна забезпечуватись умова мінімізації сили при найбільшій відстані між ударними накладками l (висока продуктивність процесу подрібнення) і найменшій швидкості руху ударної накладки V (менші витрати кінетичної енергії процесу подрібнення).

Вирішуючи спільно рівняння (2.54) разом із (2.45)–(2.53) в середовищі Wolfram Cloud отримуємо раціональні значення процесу подрібнення які наведені в таблиці 2.11.

Таблиця 2.11 – Раціональні параметри процесу подрібнення з використанням розробленого робочого органу, отримані при чисельному моделюванні

Культура	Кукурудза	Пшениця	Ячмінь
Відстань між ударними накладками l , мм	1,78	1,68	1,79
Кут між ударними накладками α , °	43,8	43,6	50,7
Швидкість руху ударної накладки V , м/с	5,86	4,72	5,26
Сила руйнування зерна при ударному різанні F_x , Н	58,8	24,6	12,9
Сила руйнування зерна при ударному різанні F_y , Н	94,6	65,3	25,6
Сила руйнування зерна при ударному різанні F_z , Н	117,1	48,2	12,4
Частота обертання диска $n = 60V/(2\pi R)$, об/хв, де $R = 0,03$ м – радіус встановлення накладки, мм.	1865	1503	1676
Модульний зазор між дисками $\delta = l - 2\iota$, мм, де $\iota = 0,5$ мм – відстань від накладки до краю диска, мм	0,78	0,68	0,79
Кут встановлення ударних накладок $\beta = \alpha/2$, °	21,9	21,8	25,3

Аналіз таблиці 2.11 дозволяє з фізичної точки зору охарактеризувати раціональні параметри процесу подрібнення зернових культур із використанням розробленого робочого органу, отримані шляхом чисельного моделювання. Основними культурами, що розглядалися, є кукурудза, пшениця та ячмінь, які суттєво відрізняються між собою як за фізико-механічними властивостями зерна, так і за енергетичними потребами для їх ефективного руйнування. Відстань між ударними накладками, яка визначає інтенсивність впливу та частоту контактів із зернами, для кукурудзи та ячменю майже однакова (1,78 та 1,79 мм відповідно), тоді як для пшениці вона менша (1,68 мм). Це свідчить про необхідність більш щільного розташування елементів для забезпечення достатнього механічного впливу на м'якіші зерна. Кут між ударними накладками α , що впливає на напрямок і площу контакту з зерниною під час удару, є найбільшим для ячменю (50,7°), тоді як для кукурудзи та пшениці цей параметр майже однаковий (~43,7°). Збільшення кута α для ячменю забезпечує більший об'єм охоплення зерна внаслідок меншої його механічної міцності.

Відповідно, кут встановлення накладок β (половина кута α) теж зростає в аналогічній послідовності – це забезпечує оптимальну траєкторію удару для кожного типу зерна.

Швидкість руху ударної накладки V , яка прямо впливає на кінетичну енергію удару, є найвищою у випадку кукурудзи (5,86 м/с), що фізично обґрунтовується високою твердістю та масивністю її зерна, яке потребує значної енергії для руйнування. Пшениця потребує меншої швидкості (4,72 м/с), а ячмінь – проміжної (5,26 м/с). Частота обертання диска, безпосередньо пов'язана з лінійною швидкістю ударної накладки за умови сталого радіуса ($R = 0,03$ м), також найвища у кукурудзи (1865 об/хв) і найнижча у пшениці (1503 об/хв). Це підтверджує необхідність збільшення динамічного впливу для подрібнення більш міцних зернин.

Механічна сутність подрібнення проявляється у значеннях сили руйнування зерна при ударному різанні в трьох напрямках (F_x , F_y , F_z), які комплексно відображають опір матеріалу до руйнівної дії. Кукурудза демонструє найбільші значення сил у всіх напрямках ($F_x = 58,8$ Н, $F_y = 94,6$ Н, $F_z = 117,1$ Н), що вказує на її високу опірність подрібненню. Пшениця має середні показники, а ячмінь – найменші, що пов'язано з меншою густиною, твердістю та структурою його оболонки. Таким чином, для кожної культури характерна своя критична сила руйнування, яка повинна досягатися при оптимальному поєднанні швидкості, частоти обертання та геометрії контактних елементів.

Конструктивний параметр – модульний зазор між дисками, що залежить від відстані між накладкою та краєм диска, також корелює з механічною міцністю зернин. Для пшениці зазор найменший (0,68 мм), що дозволяє більш точно спрямовувати зусилля на зернину, тоді як для кукурудзи та ячменю зазор більший (0,78–0,79 мм), що відповідає їх більшій геометричній товщині. З фізичної точки зору це забезпечує баланс між необхідною кінетичною енергією удару, формуванням контактної плями і напрямом розповсюдження тріщини усередині зерна при навантаженні. Загалом, чисельне моделювання дозволило сформувати набір параметрів, що забезпечують максимальну ефективність процесу подрібнення за умови мінімізації витрат енергії, руйнування зерна з заданою дисперсністю та зниження зносу робочих органів. Отримані дані мають практичну цінність для проєктування універсальних або адаптивних подрібнювачів, здатних працювати з різними типами зерна шляхом зміни режимів роботи та налаштувань конструкції.

2.5 Висновки до розділу

1. Теоретичні дослідження підтвердили доцільність застосування методу дискретних елементів (DEM) для моделювання процесів руйнування зерна при механічній обробці. Створення тривимірних багатосферних моделей зернин кукурудзи, пшениці та ячменю на основі експериментально визначених геометричних параметрів дозволило забезпечити високий рівень геометричної достовірності цифрових зразків. Впровадження контактної моделі Герца-Міндліна забезпечило точне відображення фізичної суті пружно-пластичних контактних деформацій між частинками та локальних пошкоджень матеріалу. Уведення моделі зв'язування частинок (Clumps) дало змогу описати внутрішню структуру зернини та змодельовати процес її поступового руйнування під дією контактних навантажень. Реалізація простої моделі руйнування зв'язків дозволила адекватно враховувати крихкість біоматеріалу та визначити граничні умови розтріскування. Показано, що точність моделювання суттєво залежить від значень розтягувальних і зсувних граничних напруг, які повинні встановлюватися на основі попередніх експериментальних досліджень для кожної конкретної сільськогосподарської культури.

2. Проведене чисельне моделювання процесу руйнування зерна стиском методом дискретних елементів у середовищі Simcenter STAR-CCM+ дозволило встановити ключові закономірності впливу фізико-механічних властивостей матеріалу та просторової орієнтації зернини на силу руйнування. Було змодельовано тривимірні багатосферні структури зернин кукурудзи, пшениці та ячменю та реалізовано віртуальні експерименти для трьох просторових положень зернини: горизонтального, вертикального та бокового. Застосування повного факторного плану дозволило кількісно оцінити вплив коефіцієнта Пуассона (ν), модуля Юнга (E_p) та граничної напруги розтягу/зсуву (W_p) на силу руйнування зернини стиском (2.27)–(2.35). Порівняння результатів чисельного моделювання (2.27)–(2.35) із даними лабораторних досліджень (табл. 4.4–4.6) дозволило уточнити вхідні параметри моделі для кожної культури, що забезпечило високу відповідність розрахункових і експериментальних значень сили руйнування. Визначені параметри (табл. 2.6)

модулів пружності, коефіцієнтів Пуассона та граничних напруг розтягу та зсуву для конкретних сортів (П8816, «Патрас», «Снігова Королева») можуть бути використані для подальших віртуальних досліджень і оптимізації робочих органів машин для подрібнення зерна.

3. Враховуючи специфіку конструкції нового робочого органу дискового подрібнювача з ударними накладками, досліджено вплив трьох ключових факторів (відстані між ударними накладками l , кута між ними α та лінійної швидкості руху накладки V) шляхом чисельного моделювання процесу руйнування зерна кукурудзи, пшениці та ячменю способом ударного різання із застосуванням методу дискретних елементів (DEM) у середовищі Simcenter STAR-CCM+. Встановлені закономірності сили руйнування зерна кукурудзи, пшениці і ячменя у трьох положеннях при ударному різанні від відстані між ударними накладками l , кута між накладками α та лінійної швидкості руху накладки V (2.45)–(2.53). Виявлені закономірності дозволяють дати кількісну оцінку та глибше фізичне розуміння процесів руйнування оболонки зерна в умовах ударного різання. Це є підґрунтям для оптимізації конструктивних параметрів подрібнювача, що забезпечить підвищення ефективності та енергоощадності процесу подрібнення різних типів зернового матеріалу. Для комплексної оцінки процесу подрібнення зернових культур було запропоновано інтегральний критерій ефективності (2.54), що забезпечує мінімізацію сили руйнування при максимальній відстані між ударними накладками та мінімальній швидкості їх руху. Це дозволяє досягти високої продуктивності процесу з одночасним зниженням витрат кінетичної енергії. Встановлені раціональні параметри подрібнення для основних зернових культур – кукурудзи, пшениці та ячменю (таблиця 2.11). Аналіз отриманих результатів підтверджує, що параметри процесу (відстань між накладками $l = 1,68\text{--}1,79$ мм, кути їх встановлення $\beta = 21,8\text{--}25,3^\circ$, швидкість руху $V = 4,72\text{--}5,86$ м/с, частота обертання диска $n = 1503\text{--}1865$ об/хв, модульний зазор $\delta = 0,68\text{--}0,79$ мм) відображають фізико-механічні особливості кожної культури.

Основні наукові результати, викладені в цьому розділі, знайшли відображення в публікаціях автора [176, 175].

3 МЕТОДИКА ПРОВЕДЕННЯ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ПРОЦЕСУ ПОДРІБНЕННЯ КОМПОНЕНТІВ КОНЦЕНТРОВАНИХ КОРМІВ

3.1 Мета, задачі та програма експериментальних досліджень

Метою проведення експериментальних досліджень є вибір оптимальних конструктивно-технологічних параметрів та режимів роботи дискового подрібнювача концентрованих кормів, обґрунтування геометричних параметрів поверхні розробленого робочого органу, визначення питомої енергоємності та якості (ступеня подрібнення та кількості утворення пилоподібної фракції) процесу подрібнення дискового подрібнювача концентрованих кормів.

Зміст програми експериментальних досліджень для досягнення визначеної мети:

- розробка методики, обладнання і проведення лабораторних досліджень щодо визначення зусилля руйнування зерна компонентів концентрованих кормів;
- створення експериментальної установки і допоміжного обладнання та розробка методики для визначення оптимальних конструктивно-технологічних параметрів та режимів роботи дискового подрібнювача концентрованих кормів;
- проведення експериментальних досліджень базового дискового подрібнювача концентрованих кормів;
- проведення експериментальних досліджень дискового подрібнювача концентрованих кормів з удосконаленням робочим органом.

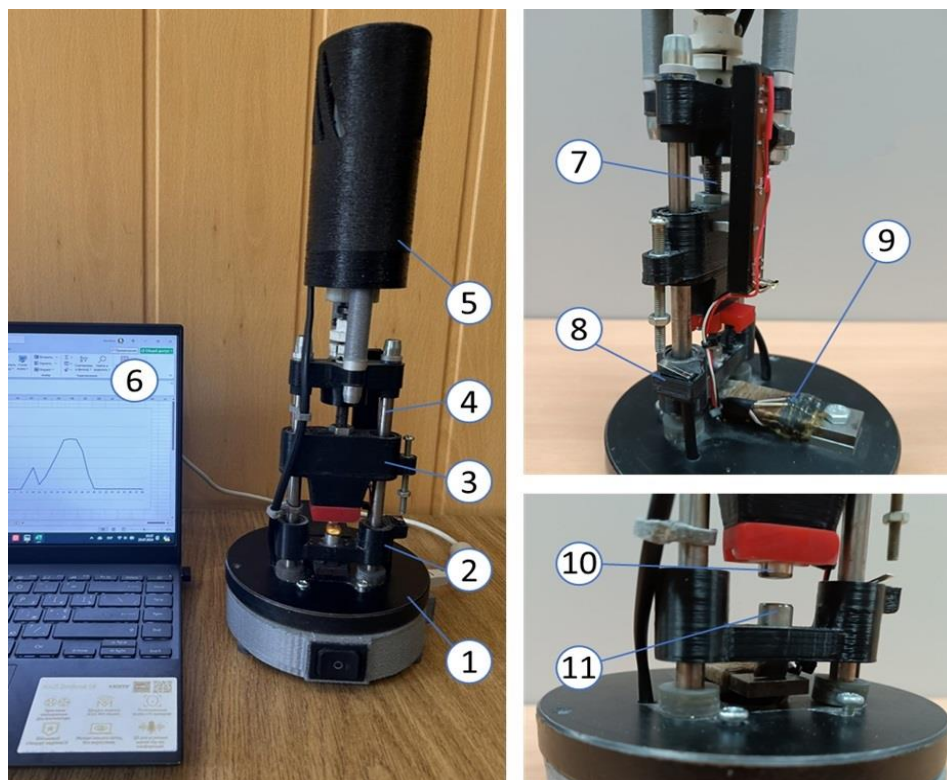
Для статистичного аналізу даних та для обробки результатів дослідження використовуються програмні пакети Excel та Wolfram Cloud.

3.2 Методика лабораторних досліджень руйнування зерна при стиску

З метою порівняння створеної моделі стиснення зернини, реалізованої в середовищі Simcenter STAR-CCM+, із реальним процесом стиснення зерна виникла

необхідність у створенні лабораторної установки, яка дозволяє експериментально відтворити процес руйнування зерна під дією стискаючих зусиль. Така установка забезпечує можливість зіставлення отриманих числових результатів моделювання з реальними значеннями сили руйнування зерна.

Сконструйований лабораторний стенд (рис. 3.1) складається з металевої станини 1, на якій змонтовано лінійні напрямні 4, опорну 2 та рухому 3 каретки.



1 – станина; 2 – опорна каретка; 3 – рухома каретка; 4 – напрямна; 5 – електродвигун постійного струму; 6 – ПЕОМ; 7 – гвинт приводу рухомої каретки; 8 – кінцевий вимикач; 9 – тензOMETричний датчик; 10 – верхній пуансон; 11 – нижній пуансон

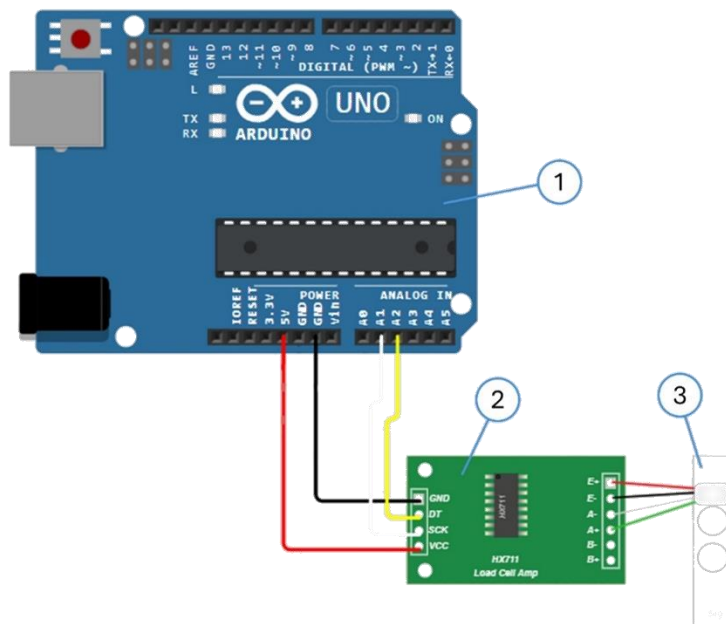
Рисунок 3.1 – Лабораторне обладнання для дослідження процесу стиску зерна

Обидві каретки ковзають по напрямним за допомогою вбудованих лінійних підшипників, що забезпечують плавність та точність вертикального переміщення. Опорна каретка 2 жорстко встановлена на тензOMETричному датчику 9, до якого кріпиться нижній пуансон 11 призматичної форми у нижній частині. Верхній пуансон 10 закріплений на рухомій каретці 3, яка переміщується у вертикальному напрямку з

контрольованою швидкістю 0,0025 м/с. Обидва пуансони мають діаметр 10 мм, що дозволяє рівномірно передавати навантаження на зернину у контрольованій зоні стиснення [176].

Переміщення рухомої каретки забезпечується електродвигуном постійного струму 5, обертання якого передається через гвинтову пару гвинт–гайка, що з'єднує вал двигуна з корпусом каретки. Нижнє положення рухомої частини конструкції обмежується упором кінцевого вимикача 8, що виключає ризик пошкодження вузлів системи [176].

Сигнал від тензометричного датчика передається до аналого-цифрового перетворювача HX711 (24-біт), після чого – на плату Arduino Uno ATmega 328P-PU (рис. 3.2). Отримані цифрові дані виводяться через USB-інтерфейс на ПЕОМ 6, де вони зчитуються та обробляються в програмному середовищі «Arduino-1.8.9-windows». Це дозволяє здійснювати безперервний контроль над навантаженням в режимі реального часу [176].



- 1 – Arduino Uno; 2 – аналого-цифровий перетворювач HX711;
3 – тензометричний датчик

Рисунок 3.2 – Схема підключення елементів

Суть методу полягає в стисканні окремої зернини між двома плоскими металевими пуансонами із постійною швидкістю руху верхнього пуансона.

Особливу увагу приділяли визначенню вологості зерна, оскільки цей параметр має вплив на механічні властивості матеріалу. Вологість визначали для гібрида кукурудзи П8816, пшениці сорту «Патрас» та ячменю сорту «Снігова Королева» (рис. 3.3). на лабораторному вологомірі Radwag MA 110.R (рис. 3.4), який працює за принципом термогравіметричного аналізу – визначення масових втрат при нагріванні. Вимірювання проводили відповідно до регламентованої методики згідно з ДСТУ ISO 712:2015 [170].



Пшениця
сорту «Патрас»



Ячмінь
сорту «Снігова Королева»



Гібрид кукурудзи
П8816

Рисунок 3.3 – Досліджуване зерно



Лабораторний вологомір
Radwag MA 110.R



Індикаторний товщиномір
TP 25-100



Лабораторні ваги
JD-2200-2

Рисунок 3.4 – Загальний вигляд лабораторного обладнання

Вологість гібрида кукурудзи П8816 становила 12,34%, пшениці сорту «Патрас» – 11,31 %, а ячменю сорту «Снігова Королева» – 10,78 %. Встановлені значення вологості відповідають рекомендаціям щодо вологості зерна для кормових цілей. Згідно з ДСТУ, вологість зерна не має перевищувати 15% для кукурудзи [167], 14% для пшениці [164] і 15,5% для ячменю [165]. Таким чином, усі досліджувані зразки мали вологість нижчу допустимих значень, що дозволяє вважати їх стан стабільним, а отримані експериментальні результати такими, що не спотворені впливом надмірної вологості. Це важливо, оскільки вологість є одним з ключових факторів, що впливає на міцність зернового матеріалу.

Для проведення комплексної оцінки деформаційних характеристик та міцності зернового матеріалу було відібрано по 50 зернин кожної із трьох сільськогосподарських культур. Відбирання зернин у кожній групі здійснювали випадковим чином із загальної вибірки, що дозволило забезпечити статистичну репрезентативність дослідження.

Для кожної окремої зернини визначали геометричні розміри – довжину, ширину та висоту за допомогою індикаторного товщиноміра типу ТР 25–100 (рис. 3.4). Цей прилад забезпечує точність вимірювання до 0,01 мм, що дозволяє з високою точністю визначити максимальні розміри зернини (рис. 3.5). Крім того, для кукурудзи додатково визначали масу кожної зернини за допомогою лабораторних аналітичних ваг JD-2200-2 (рис. 3.4), які мають межу зважування 2200 г і точність 0,01 г. Такі ваги дозволяють точно визначити щільність та об'ємну масу зерна при подальших розрахунках.



L – довжина; W – ширина; H – товщина

Рисунок 3.5 – Геометричні параметри зерна кукурудзи

Далі визначали зусилля руйнування кожної замірної зернини відповідно. Під час випробувань на стискання здійснювали фіксацію прикладеного зусилля у режимі реального часу за допомогою ПЕОМ і програмного середовища «Arduino-1.8.9-windows». Це дозволило отримати графік залежності прикладеного зусилля від часу і визначити силу руйнування (рис. 3.6). Дослідження проводили у трьох взаємно перпендикулярних просторових положеннях кожної зернини (рис. 3.7), що дозволило врахувати будову зерна та варіативність результатів залежно від вектору прикладення навантаження.

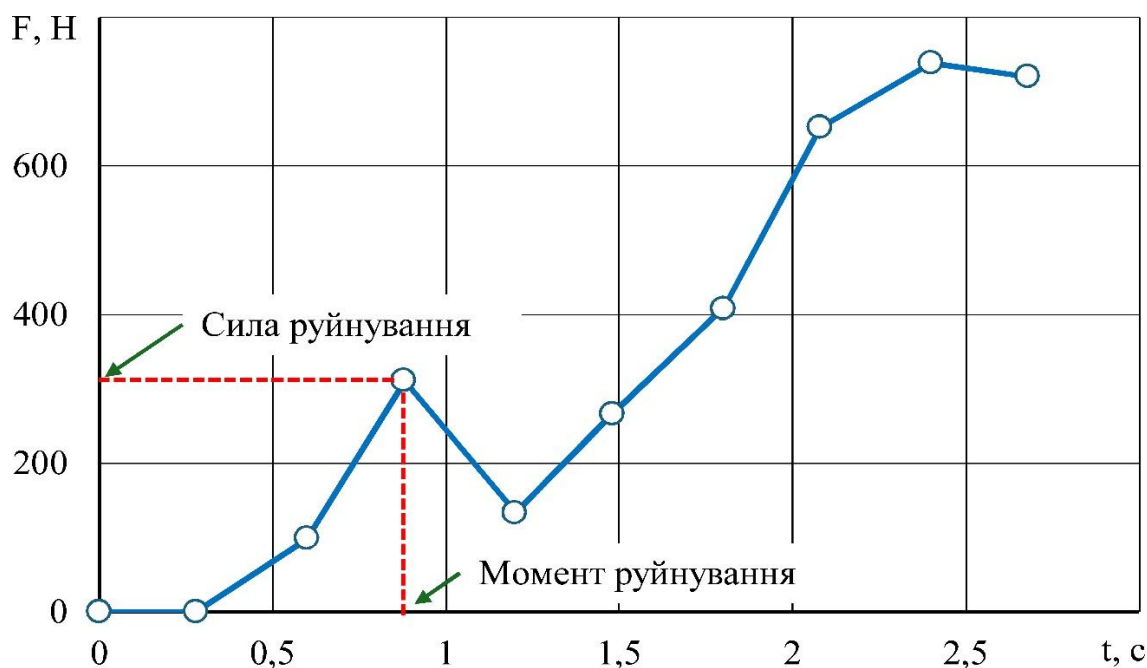


Рисунок 3.6 – Приклад залежності прикладеного зусилля F при стиску зерна кукурудзи від часу t

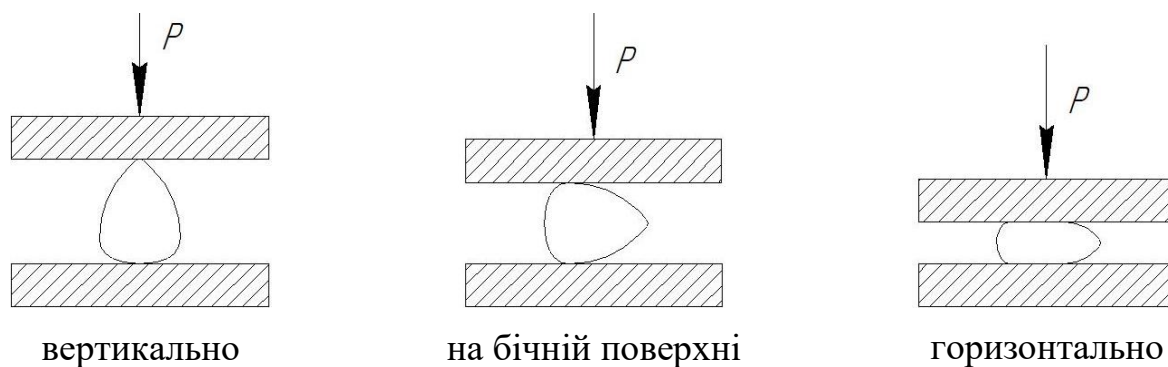


Рисунок 3.7 – Положення зернини при визначенні зусилля руйнування

3.3 Стенд для проведення експериментальних досліджень

В якості експериментального дискового подрібнювача зерна було обрано подрібнювач Поток РП-1 (рис. 3.8) виробник «Поток», Запорізька область, м. Токмак. Необхідно провести дослідження базової установки, оскільки надана виробником інформація щодо продуктивності некоректна, оскільки не вказано, при подрібненні якого саме зерна досягається зазначена продуктивність. Окрім цього, виробником не надана інформація щодо якості отриманого продукту (фракційний склад).



Загальний вигляд



Верхній нерухомий диск



Нижній рухомий диск

Рисунок 3.8 – Базовий дисковий подрібнювач Поток РП-1 і його робочі органи

Удосконалення подрібнювача було здійснено шляхом заміни базових робочих органів на диски з ударними накладками (рис. 3.9), відповідно до конструктивного рішення, описаного в розділі 1.7. Диски виготовлені зі сталі 40Х, а ударні накладки – зі сталі ВК8. Така модернізація дозволяє реалізувати імпульсно-ударний принцип дії, що забезпечує більш ефективне руйнування зернин за рахунок концентрації навантаження у зонах контакту та покращення умов передачі енергії деформації оболонки зернини.

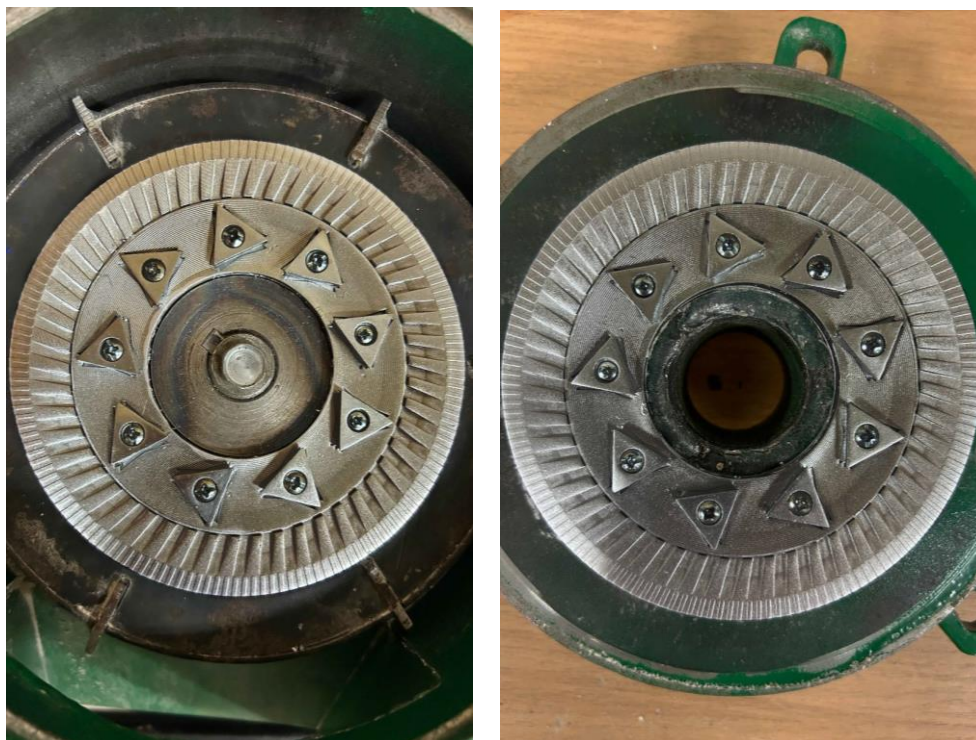
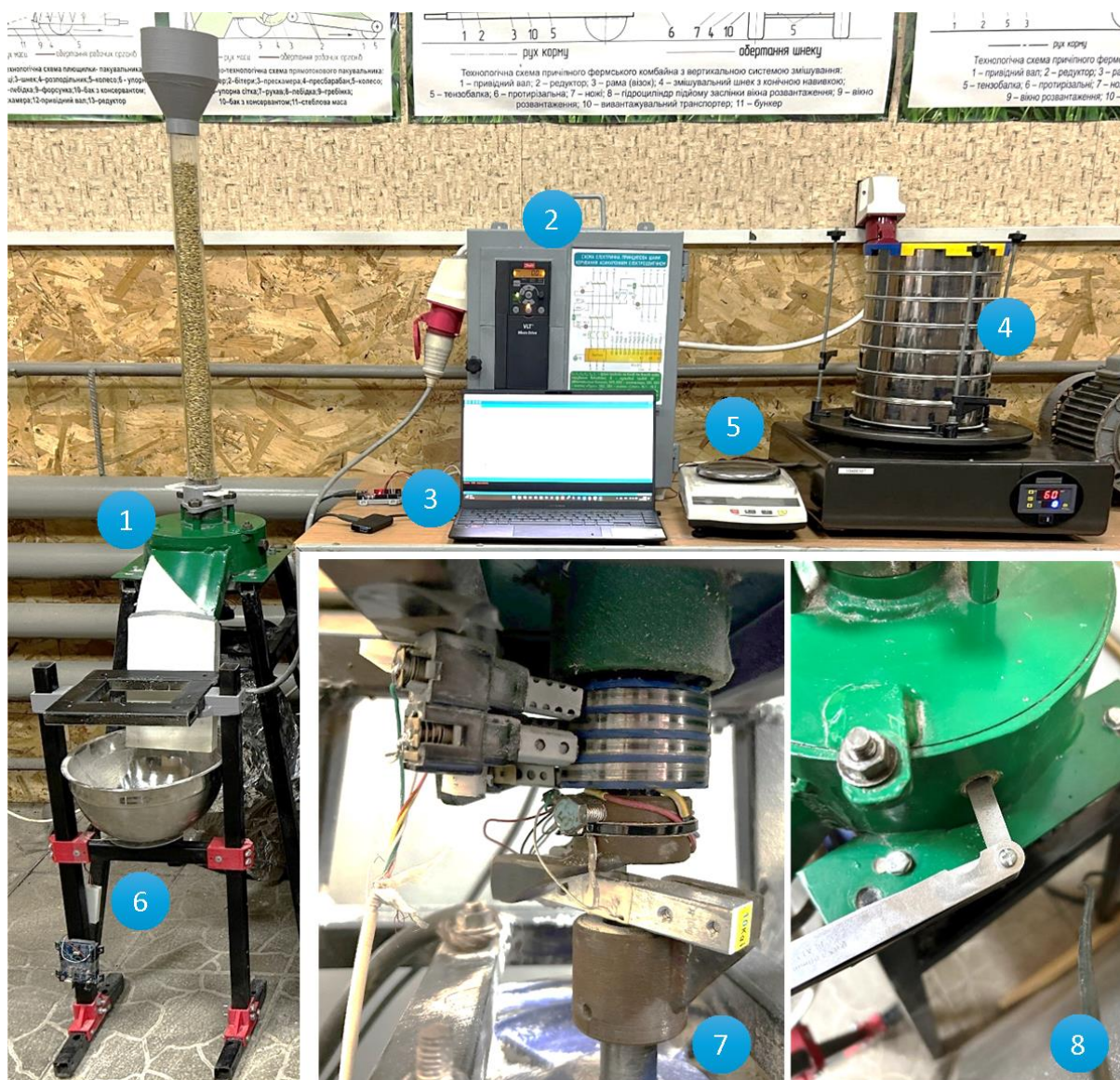


Рисунок 3.9 – Удосконалений робочий орган дискового подрібнювача

Для реалізації експериментальних досліджень, спрямованих на вивчення параметрів роботи дискового подрібнювача концентрованих кормів, було створено спеціалізований апаратно-програмний комплекс. Цей комплекс дозволяє здійснювати моніторинг, запис та обробку даних, що характеризують процес подрібнення, зокрема таких ключових показників, як крутний момент на робочому валу та маса подрібненого матеріалу. Завдяки цьому з'являється можливість проводити високоточні вимірювання у реальному часі, що є особливо важливим при дослідженні ефективності функціонування технічних засобів та оптимізації їхніх конструктивно-технологічних параметрів.

Основним елементом експериментального стенда (рис. 3.10) виступає лабораторний дисковий подрібнювач концентрованих кормів 1 (рис. 3.11). Його конструкція дозволяє змінювати режими роботи та адаптувати умови досліду відповідно до заданих параметрів. Для регулювання частоти обертання диска використовується частотний перетворювач Danfoss VLT® Micro Drive FC51 2, який

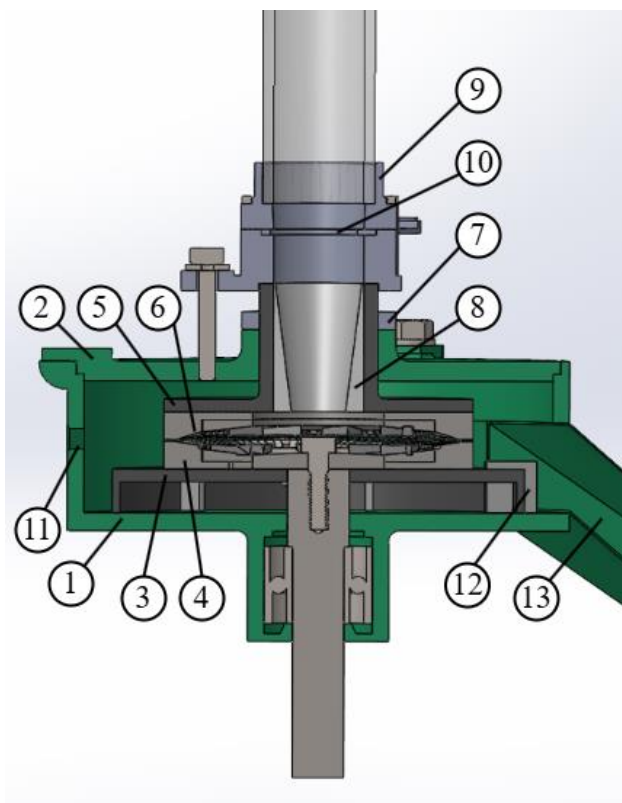
забезпечує плавне керування швидкістю обертання електродвигуна, тим самим дозволяючи дослідити вплив частоти обертання на ефективність подрібнення.



- 1 – дисковий подрібнювач; 2 – стенд для керування електроприводами на основі частотного перетворювача Danfoss; 3 – ПЕОМ; 4 – розсіювач лабораторний РЛУ-3К; 5 – ваги лабораторні JD-2200-2; 6 – система зважування у поточному часі готового продукту; 7 – вимірювач крутного моменту; 8 – отвір для встановлення модульного зазору

Рисунок 3.10 – Загальний вигляд дослідної установки на основі експериментального дискового подрібнювача

Для вимірювання крутного моменту, який виникає під час роботи подрібнювача, спеціально було розроблено вимірювач крутного моменту 7. Цей пристрій дозволяє реєструвати механічне навантаження у точці з'єднання валу двигуна та валу робочого диска. Вимірювач крутного моменту підключений до персонального комп'ютера 3.



а



б

а – 3D-модель; б – загальний вигляд; 1 – робоча камера; 2 – верхня кришка робочої камери; 3 – тримач нижнього обертового диска; 4 – нижній обертовий диск; 5 – тримач верхнього нерухомого диска; 6 – верхній нерухомий диск; 7 – контргайка механізму встановлення модульного зазору; 8 – змінна втулка встановлення подачі матеріалу; 9 – завантажувальна горловина; 10 – шиберна засувка; 11 – отвір для встановлення модульного зазору; 12 – лопать; 13 – патрубок для відводу подрібненого продукту

Рисунок 3.11 – Лабораторний дисковий подрібнювач концентрованих кормів

У складі комплексу також передбачено лабораторний розсійник РЛУ-3К 4 з набором сит, який використовується для аналізу фракційного складу подрібненого зерна. Завдяки йому можна точно оцінити фракційний склад подрібненого зерна. Отримані дані поєднуються з інформацією щодо навантажень та енергоспоживання, що дозволяє комплексно оцінити ефективність роботи дробарки.

Крім того, до складу експериментального стенда входять лабораторні аналітичні ваги JD-2200-2 5, які забезпечують високу точність зважування фракцій подрібненого зерна, а також спеціально сконструйовані дослідні ваги (система зважування у поточному часі готового продукту) з тензометричним датчиком 6. Останні дозволяють реєструвати зміну маси зерна в режимі реального часу безпосередньо під час процесу подрібнення, що є особливо важливим для аналізу продуктивності подрібнювача.

Контроль значення модульного зазору проводять за допомогою відповідного щупа, використовуючи отвір 8 в корпусі робочої камери.

Розроблений стенд дозволяє проводити не лише якісні вимірювання, а й здійснювати порівняльний аналіз роботи подрібнювача при зміні конструктивних параметрів або умов подачі зерна.

Регулювання частоти обертання електродвигуна в дослідному стенді здійснювалося за допомогою частотного перетворювача Danfoss VLT® Micro Drive FC 51 (рис. 3.12). Цей пристрій вирізняється компактними розмірами, високою надійністю та широким діапазоном застосувань, включаючи керування асинхронними двигунами потужністю від 0,18 до 22 кВт [26].

Частотний перетворювач працює з однофазною (200–240 В $\pm 10\%$) або трифазною (200–240 В або 380–480 В $\pm 10\%$) вхідною напругою, забезпечуючи вихідну частоту в діапазоні від 0 до 200 Гц у режимі VVC+ або до 400 Гц у режимі U/f. Важливою перевагою є здатність забезпечувати короткочасне перевантаження на рівні 150% номінального моменту протягом однієї хвилини, що дозволяє адаптуватися до умов роботи з нестабільними навантаженнями [26].

Для ефективного використання перетворювач має вбудований фільтр радіоперешкод, що значно знижує рівень електромагнітних завад, а також

автоматичну оптимізацію енергоспоживання (АЕО) і автоматичну адаптацію параметрів двигуна (АМА). Це забезпечує не тільки зменшення енергоспоживання, а й точну адаптацію пристрою до конкретного електродвигуна без додаткових налаштувань [26].

Управління перетворювачем є гнучким завдяки наявності аналогових і цифрових входів і виходів, а також підтримці популярних протоколів зв'язку FC Protocol та Modbus RTU. Наявність інтегрованого ПІ-регулятора спрощує реалізацію систем автоматичного керування без використання додаткових зовнішніх контролерів [26].

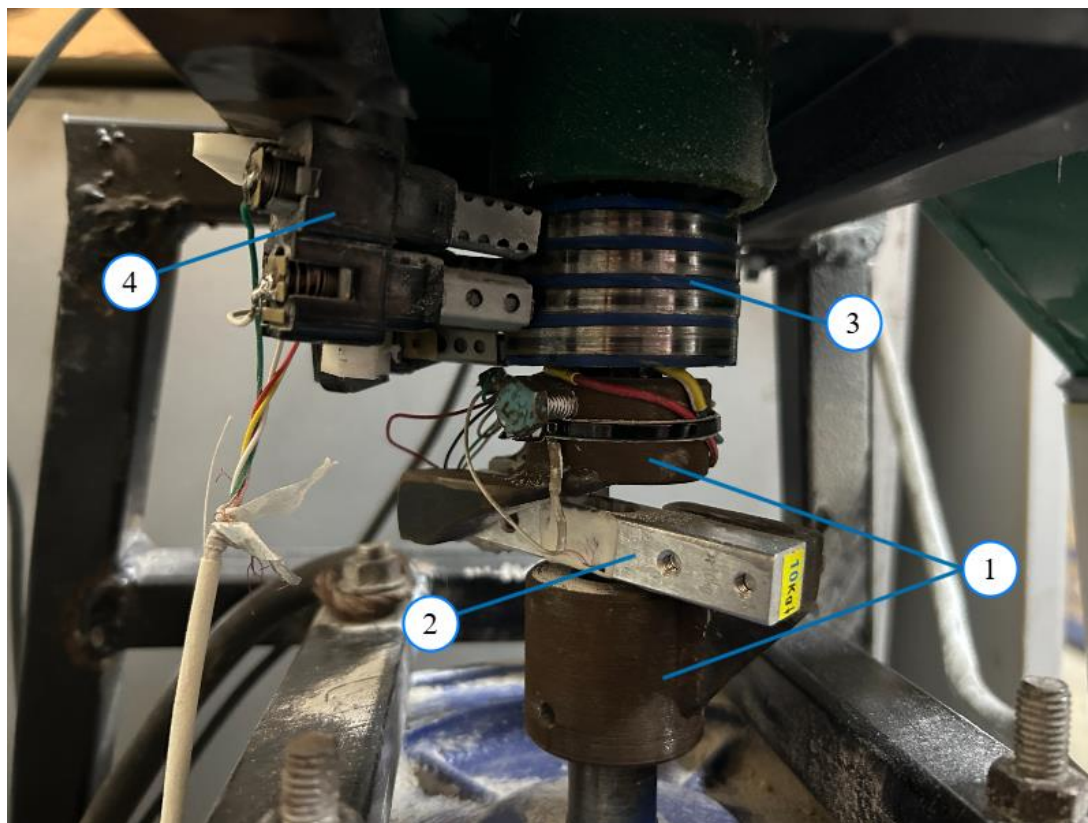
Зручність монтажу та експлуатації перетворювача Danfoss VLT® Micro Drive FC 51 забезпечується його форматом та захистом внутрішніх електронних компонентів від впливу вологості й пилу завдяки спеціальному покриттю плат захисним лаком. Ці властивості роблять його оптимальним вибором для застосування в дослідницьких стендах, зокрема для дослідження дискового подрібнювача.



Рисунок 3.12 – Danfoss VLT® Micro Drive FC 51

Для визначення значення крутного моменту, який діє на диск подрібнювача під час його роботи, було сконструйовано вимірювач крутного моменту (рис. 3.14).

Конструктивно він складається з муфти 1, яка виконує функцію з'єднання між валом електродвигуна та валом робочого диска. В цій муфті встановлено тензометричний датчик 2, що реєструє деформації, спричинені дією крутного моменту, та дозволяє в режимі реального часу визначати його величину.



1 – муфта; 2 – тензометричний датчик; 3 – ротор з контактними кільцями;
4 – щітковий вузол

Рисунок 3.14 – Вимірювач крутного моменту

З'єднання валів реалізовано через спеціально розроблену муфту 1, одна половина якої жорстко приєднана до валу двигуна, а інша — до валу робочого органу. До однієї половини муфти прикріплений тензодатчик 2. У конструкції передбачено невеликий зазор між двома половинами муфти, що дозволяє сприймати механічну деформацію тензометричним датчиком. Цей датчик розташований так, щоб фіксувати зусилля згину, яке виникає при передачі обертового моменту від двигуна до диска.

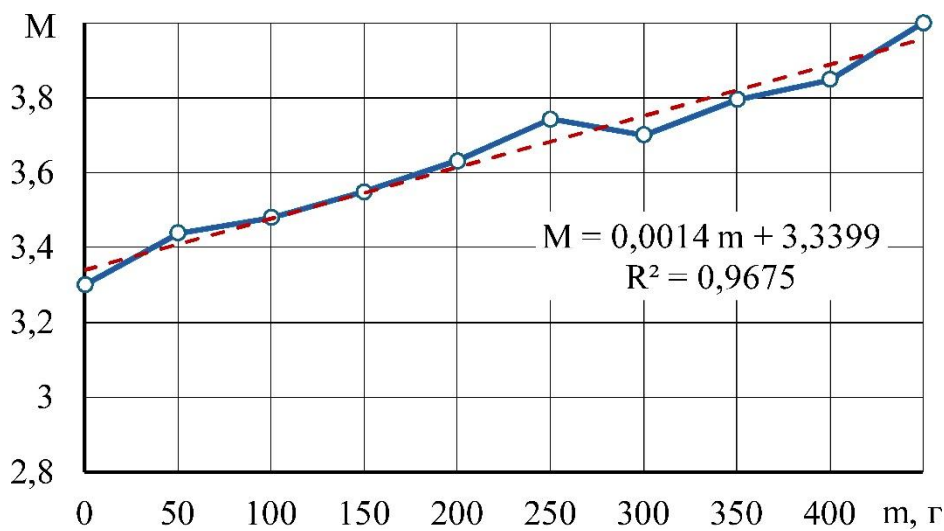
На валу диска закріплено спеціальний ротор 3, виготовлений за допомогою 3D-принтера Creality K1 Max. На його поверхню напресовано чотири металеві контактні кільця, які слугують для передачі електричного сигналу з обертового тіла на стаціонарну частину схеми. Дроти від тензометричного датчика з'єднані з цими кільцями, що дозволяє передавати аналоговий сигнал при обертанні валу.

Зчитування сигналу організовано через щітковий вузол 4, який складається з щіткотримача, надрукованого на 3D-принтері, і чотирьох графітових щіток. Цей вузол прикріплено до рами установки. Графітові щітки постійно контактують з металевими кільцями, забезпечуючи стабільну передачу сигналу до аналого-цифрового перетворювача HX711. Сам HX711, як і у випадку з лабораторними вагами, підсилює сигнал і перетворює його у цифрову форму, яку передає на мікроконтролер Arduino Uno. Схема з'єднання компонентів представлена на рис. 3.2. Arduino, у свою чергу, з'єднується з персональним комп'ютером, де встановлено програмне забезпечення Arduino IDE версії 1.8.9. Це дає змогу в реальному часі зчитувати, обробляти та виводити дані, що відповідають фактичному крутному моменту, який діє на робочий орган подрібнювача.

Особливу увагу було приділено процесу калібрування тензометричного датчика (рис. 3.15, а), адже точність вимірювання моменту безпосередньо залежить від правильності визначення калібрувального коефіцієнта. Зусилля прикладалося до тензобалки на відстані 6 см від її центру. Для створення контрольованого моменту сили використовувалась шпилька, що угвинчувалась у вал. До неї кріпився металевий профіль з виїмкою на відстані 60 см від центра прикладання сили (тобто в 10 разів далі від точки на тензобалці). У цю виїмку встановлювалась спеціальна платформа навантаження, на яку поступово додавалися вантажі з відомою масою. Для кожного рівня навантаження реєстрували показники тензометричного датчика. Отримані дані були використані для побудови калібрувальної залежності між сигналом тензодатчика і встановленою вагою (рис. 3.15, б). На основі цього емпіричного ряду було знайдено рівняння, яке надалі інтегрувалося в програмний код Arduino для автоматичної корекції вимірювань.



а



б

Рисунок 3.15 – Процес (а) і результат (б) калібрування тензометричного датчика вимірювача крутного моменту

Завдяки проведеній методиці калібрування, система дозволила точно зв'язати цифрові показники тензодатчика з крутним моментом, що виникає в муфті під час експлуатації дискового подрібнювача. Це дозволило використовувати отримані значення не лише для моніторингу, але й для подальшої статистичної обробки, аналізу енергоефективності та оптимізації параметрів роботи машини.

Для визначення маси зерна у процесі його подрібнення в режимі реального часу, а також для визначення подачі зерна, було створено спеціалізовані дослідні ваги з електронною системою вимірювання, які дозволяють забезпечити високу точність результатів вимірювання.

Конструктивно ваговий стенд (рис. 3.16) складається з жорсткої металевої рами 1, яка є основою та забезпечує механічну стабільність під час роботи. На рамі встановлена пересувна горизонтальна поперечина 2, яка може регулюватися по висоті для адаптації під ємності різних розмірів. На поперечині жорстко закріплений тензометричний датчик сили 3, який виконує основну функцію перетворення механічного навантаження від маси зерна в електричний сигнал. Цей датчик має високу чутливість і використовується в поєднанні з платформою 4, на якій розміщується ємність. При зміні навантаження на платформу тензодатчик реєструє

відповідну деформацію, що виникає у балці і перетворює її в аналоговий сигнал, пропорційний прикладеній силі. Аналоговий сигнал із тензометричного датчика надходить до аналого-цифрового перетворювача (АЦП) моделі НХ711 5. Цей мікросхемний модуль призначений спеціально для роботи з тензометричними датчиками і має вбудовану систему підсилення сигналу (до 128 разів), що дозволяє зчитувати навіть найменші зміни у навантаженні. НХ711 забезпечує точне та стабільне вимірювання маси, фільтруючи перешкоди та флуктуації сигналу. Перетворений цифровий сигнал передається на мікроконтролер Arduino Uno 6, який виступає в ролі центрального обчислювального вузла. Схема під'єднання цих компонентів показана на рисунку 3.2. Програма, завантажена на Arduino, обробляє вхідні дані та виводить результат у вигляді числового значення маси зерна, а також вказує момент часу. Для візуалізації даних Arduino з'єднаний з ПЕОМ 7 за допомогою USB-кабелю. На комп'ютері попередньо встановлено середовище програмування Arduino IDE версії 1.8.9, яке дозволяє не лише завантажувати прошивку в мікроконтролер, але й здійснювати зчитування показників ваг у реальному часі через вбудований монітор порту.

Дана система є зручною для використання в лабораторних умовах, оскільки дозволяє проводити серію експериментів з подрібнення зерна та водночас фіксувати зміну його маси без необхідності механічного втручання або припинення роботи обладнання. Окрім того, система підтримує функцію калібрування тензодатчика за допомогою спеціального програмного коду, що дозволяє досягти високої точності вимірювань до 0,01 г. Це особливо важливо при роботі з невеликими пробами зерна, коли навіть незначні похибки можуть суттєво вплинути на результат дослідження.

Загалом, використання автоматизованої системи на базі тензометричного датчика, НХ711 та Arduino значно підвищує ефективність проведення експериментальних досліджень, забезпечуючи точність, повторюваність результатів та можливість інтеграції з іншими лабораторними системами.

У процесі дослідження дисперсного складу продуктів подрібнення важливою складовою є точне та відтворюване фракційне розділення зразків. Для цього було

використано лабораторний розсійник РЛУ-3К, призначений для просіювання сипких матеріалів з метою визначення їх гранулометричного складу [198, 197].

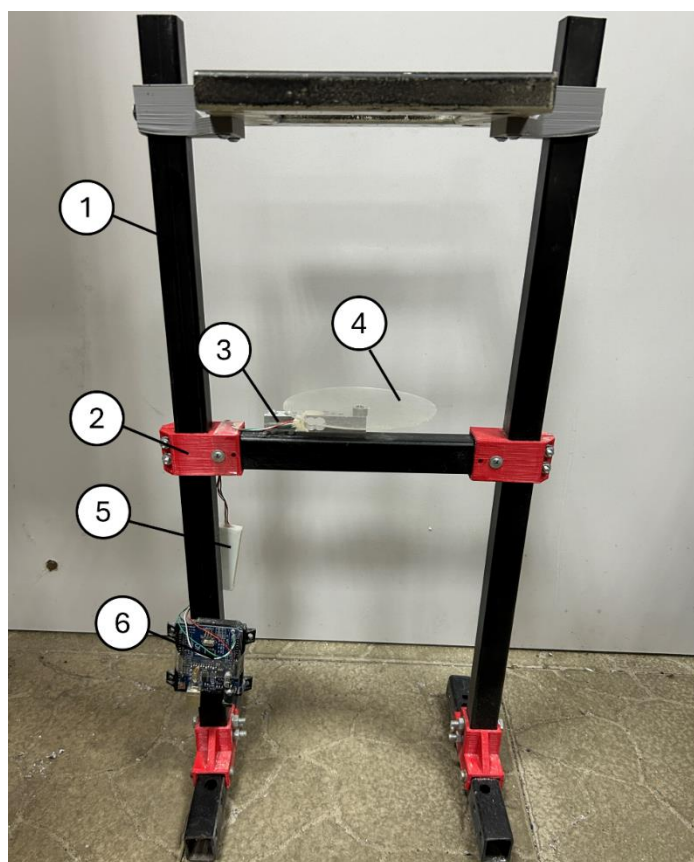


Рисунок 3.16 – Стенд для визначення пропускної здатності
завантажувального отвору

Для вимірювань маси в лабораторних умовах використовувались лабораторні аналітичні ваги JD-2200-2 (рис. 3.4), які забезпечують зважування матеріалів із точністю до 0,01 г при максимальному навантаженні до 2200 г [200, 193].

3.4 Методика експериментальних досліджень базового дискового подрібнювача

Експериментальні дослідження робочого процесу дискового подрібнювача концентрованих кормів проводили із застосуванням методології планування

багатофакторного експерименту. Такий підхід дав змогу суттєво підвищити ефективність дослідницької роботи, оптимізувати витрати часу й ресурсів, а також забезпечити достатню повноту і точність дослідження процесу подрібнення.

Метою експерименту було визначити вплив основних регульованих параметрів – частоти обертання ротора n (об/хв); зазору між дисками δ (мм); та подачі матеріалу G (кг/год) – на ключові експлуатаційні показники роботи подрібнювача (табл. 3.1). Серед таких показників продуктивність машини Q (кг/год) та спожита потужність N (кВт), які були перераховані у питому енергоємність q (кВт·год/т); а також якість подрібнення, яка надалі аналізувалася за фракційним складом отриманого матеріалу.

Таблиця 3.1 – Матриця плану експерименту базового дискового подрібнювача та рівні варіацій факторами [172]

Рівні варіацій факторів, матриця дослідів	Фактори		
	Подача зерна в камеру подрібнення G , кг/год	Модульний зазор між дисками δ , мм	Частота обертання диска n , об/хв
	X_7	X_8	X_9
Верхній рівень (+)	1350	1,6	3000
Основний рівень (0)	900	1,1	2250
Нижній рівень (-)	450	0,6	1500
Інтервал варіацій	450	0,5	750

Для визначення фактичних значень подачі зернової сировини в дослідженнях базового дискового подрібнювача було розроблено та виготовлено експериментальний стенд. Його основним елементом стали спеціально сконструйовані дослідні ваги, призначені для безперервного вимірювання маси зерна, яке надходить із бункера до зони подрібнення. На платформу вагів монтували верхню частину конструкції подрібнювача, яка включала кришку з закріпленням на ній верхнім диском, завантажувальним бункером та регульовальною заслінкою (рис. 3.17).

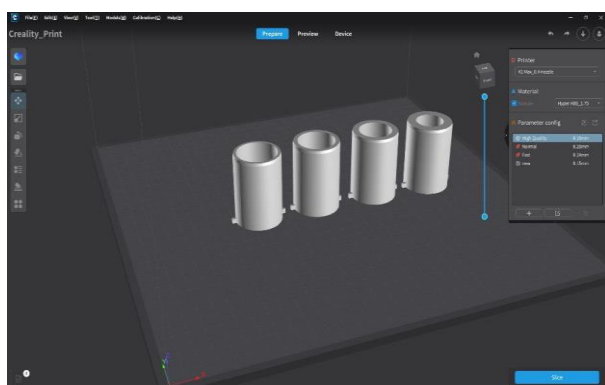


Рисунок 3.17 – Процес визначення подачі зерна

Електронна частина вагів була під'єднана до персонального комп'ютера. Зчитування, обробку та реєстрацію результатів проводили з використанням платформи Arduino IDE, яка забезпечувала безперервний моніторинг маси матеріалу в динаміці. Регулювання інтенсивності подачі здійснювали шляхом зміни діаметра завантажувального отвору. Для цього було виготовлено набір знімних втулок діаметрами 21 мм і 28 мм (рис. 3.18) за допомогою 3D-друку, використовуючи принтер Creality K1 Max і програмне забезпечення Creality Print, тоді як отвір без втулки мав номінальний діаметр 35 мм, що відповідав максимальній подачі.

Дослідження проводили окремо для кожного виду зерна – пшениці сорту «Патрас», ячменю сорту «Снігова Королева» та гібрида кукурудзи П8816. Перед початком вимірювань бункер заповнювали зерном доверху. Після цього повністю

відкривали заслінку і фіксували зміну маси на комп'ютері упродовж певного інтервалу часу. Зважування матеріалу в потоці здійснювалося з точністю 0,1 г. Для підвищення достовірності експерименту кожен вимір повторювали тричі. Результатом є графік, приведений на рис. 3.19, відношення Δm до Δt і буде шуканою подачею. Отримані значення усереднювали, що дозволяло врахувати випадкові відхилення.



Створення 3D-моделі



3D-друк



Виготовлені втулки

Рисунок 3.18 – Процес виготовлення втулок для зміни діаметра завантажувального отвору

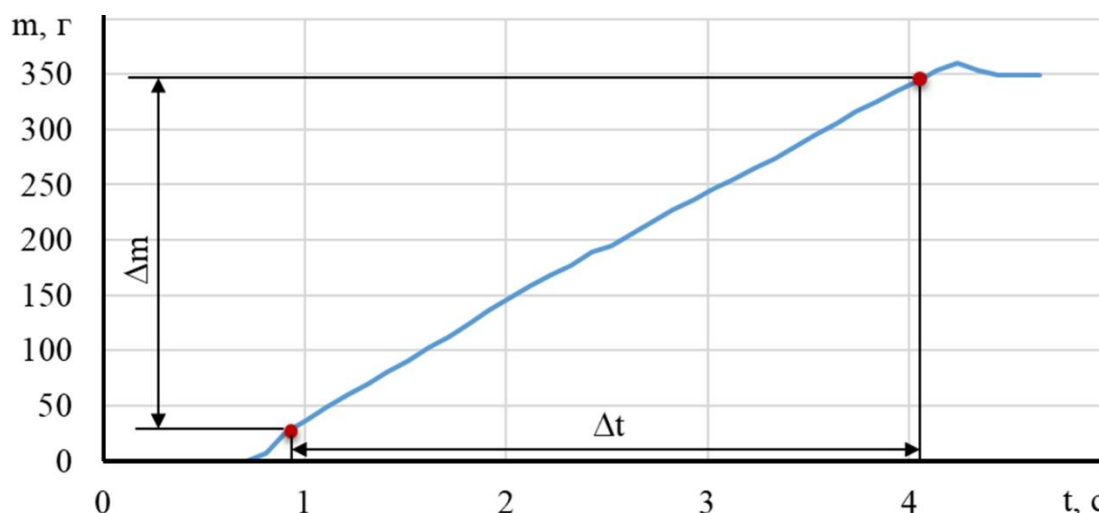


Рисунок 3.19 – Приклад результатів визначення подачі зернового матеріалу

Процедуру повторювали для кожного з обраних діаметрів отвору. З метою подальшої стандартизації експериментальних умов та забезпечення відповідності подачі вимогам плану експерименту, отримані результати було оброблено в програмі Excel. Побудовані графіки залежності подачі від діаметра отвору для кожної зернової культури дали змогу отримати відповідні рівняння регресії. Виходячи з цих рівнянь, розраховували необхідний діаметр вхідного отвору для кожної культури так, щоб забезпечити однакову подачу відповідно до значень, заданих у плані експерименту (табл. 3.2). Таким чином було досягнуто узгодженості умов проведення досліджень для різних видів сировини при збереженні порівнянності результатів.

Таблиця 3.2 – Результати калібрування втулки для встановлення відповідної подачі для різних зернових матеріалів

Подача G, кг/год	Діаметр отвору втулки D, мм		
	Пшениця	Ячмінь	Кукурудза
450	20,5	22,6	21,8
900	26,0	28,7	26,0
1350	31,5	35,0	30,2

Для проведення досліджень дискового подрібнювача концентрованих кормів використовували зерно пшениці сорту «Патрас» з вологістю 11,31%, ячменю сорту «Снігова Королева» з вологістю 10,78%, та гібрида кукурудзи П8816 з вологістю 12,34%.

Експериментальні дослідження робочого процесу базового дискового подрібнювача проводили відповідно до плану експерименту. Перед початком кожного дослід у завантажувальний отвір подрібнювача встановлювали змінну втулку відповідного внутрішнього діаметра згідно з умовами плану експерименту залежно від досліджуваної культури і необхідної подачі G.

Встановлювали необхідний зазор між дисками δ , контролюючи його через технологічний боковий отвір у корпусі подрібнювача. Для точного встановлення величини зазору використовували набір щупів INTERTOOL AT-0002.

У завантажувальний бункер засипали наважку зерна масою 300 г, яке попередньо зважували на лабораторних вагах. Частоту обертання валу електродвигуна регулювали за допомогою частотного перетворювача, встановлюючи значення, передбачене планом дослідження. Після цього на персональному комп'ютері запускали програмне забезпечення «Arduino-1.8.9-windows», яке використовувалося для зчитування та фіксації експериментальних даних у реальному часі.

Після запуску електродвигуна очікували досягнення заданої частоти обертання ротора, що підтверджувалося стабільністю показників у програмному інтерфейсі. Далі повністю відкривали заслінку бункера і зерно безперешкодно надходило в робочу зону подрібнювача. Після завершення подрібнення порції матеріалу двигун вимикали. Отриманий після кожного дослідження зерновий матеріал використовували для подальшого визначення гранулометричного складу, що описано у розділі 3.6.

Після кожного дослідження в ПЕОМ фіксували отримані дані, зокрема тривалість подрібнення, значення моменту сили на валу та вагу подрібненого матеріалу. Вагу подрібненого матеріалу і час на його подрібнення фіксували при виході дробарки на робочий режим. Отримані дані використовували для подальших розрахунків продуктивності, споживаної потужності та питомої енергоємності, що лягли в основу побудови математичних моделей оцінювання ефективності роботи подрібнювача. Такий підхід забезпечив відтворюваність умов дослідів і високу достовірність експериментальних результатів.

На основі отриманих результатів розраховували питому енергоємність процесу подрібнення:

$$q = \frac{P}{Q}, \quad (3.1)$$

де Q – продуктивність подрібнювача, т/год; P – потужність витрачена на подрібнення, кВт.

Продуктивність визначали за часом витраченим на подрібнення порції зерна:

$$Q = \frac{\frac{m_n}{t_n} \cdot 3600}{1000}, \quad (3.2)$$

де m_n – маса наважки, г; t_n – час подрібнення, с.

Потужність розраховували на основі отриманих даних моменту з тензометричного датчика:

$$P = \frac{2\pi \cdot M_{\text{сер}} \cdot n}{60}, \quad (3.3)$$

де $M_{\text{сер}}$ – середнє значення моменту, Н·м; n – частота обертів, об/хв.

Для оцінки якості подрібнення зернового матеріалу було використано метод фракційного аналізу за допомогою лабораторного розсійника моделі РЛУ-3К. Подрібнене зерно після виходу з дробарки пересипали до приймального бункера розсійника, де воно рівномірно розподілялося по сітчастим поверхням набору лабораторних сит. Для дослідження застосовували сита з різними діаметрами отворів: 0,2 мм, 0,5 мм, 1 мм, 1,5 мм та 2 мм.

Розсів проводили протягом 3 хвилин, що є достатнім для досягнення стабільного поділу зерна на фракції відповідно до розмірів частинок. Тривалість була обрана з урахуванням попередніх досліджень, що показали ефективність сортування при такому часовому інтервалі. У процесі роботи пристрою кожна фракція затримувалась на відповідному ситі, в той час як найдрібніші частинки проходили через усі шари та накопичувалися в нижньому лотку (рис. 3.20).



Рисунок 3.20 – Розподіл подрібненої маси по ситах з різними діаметрами отворів

Після завершення процесу розсіву кожену фракцію акуратно знімали з сит і зважували за допомогою високоточних лабораторних аналітичних ваг JD-2200-2. Отримані значення мас фракцій записували до відповідного плану експерименту, після чого виконувалося математичне опрацювання результатів. На основі співвідношення маси фракцій до загальної маси зразка обчислювався ступінь подрібнення, що характеризує ефективність процесу подрібнення та однорідність отриманої маси. Це значення дозволяє оцінити, наскільки рівномірно відбулося подрібнення та який відсоток частинок знаходиться в межах технологічно допустимих розмірів. Результати цього аналізу використовувалися як один із головних показників для порівняння режимів роботи дискового подрібнювача, а також для оптимізації процесу подрібнення.

Ступінь подрібнення визначали за формулою:

$$\lambda = \frac{D_e}{M}, \quad (3.4)$$

де D_e – еквівалентний діаметр зернівки, мм; M – модуль подрібнення, мм.

Модуль подрібнення знаходили за формулою [192]:

$$M = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} d_{ci} \cdot m_i}{\sum_{i=1}^{i=n} m_{ni}}, \quad (3.5)$$

де M – модуль подрібнення, мм; d_{ci} – середнє значення діаметру частинок i -тої фракції, мм; m_i – маса частинок i -тої фракції, г; n – кількість фракцій.

Для визначення еквівалентного діаметра зернівки D_e було необхідно попередньо встановити середній об'єм однієї зернини для кожного типу зернової культури – кукурудзи, пшениці та ячменю. Для цього використовували лабораторну методику, що передбачає визначення об'єму через занурення тіла у рідину за принципом витіснення.

На першому етапі зважували на аналітичних вагах JD-2200-2 наважку масою 10 грамів зерна відповідного виду. Після цього вручну підраховували точну кількість зернин у відібраній масі. Це дозволяло обчислити середню масу однієї зернини.

Наступним кроком було визначення об'єму всієї наважки. Для цього зерно обережно занурювали в мірний скляний посуд, попередньо заповнений точною кількістю рідини – 10 мл. Важливо, щоб обрана рідина не викликала процесів гідратації, набухання або розчинення оболонки зернівки, оскільки це може вплинути на достовірність результатів. Найбільш поширеними у таких дослідках є ксилол, толуол або рослинна олія. У даному випадку було використано саме рослинну олію, оскільки вона є хімічно нейтральною, доступною та не змінює структуру зерна під час короткочасного контакту.

Після занурення зерна у рідину реєстрували новий об'єм у мірному посуді (рис. 3.21). Різниця між початковим рівнем рідини (10 мл) та об'ємом після занурення наважки відповідала повному об'єму витісненої рідини, тобто об'єму зернин. Отримане значення ділили на кількість зернин у наважці, щоб визначити середній об'єм однієї зернини:

$$V_z = \frac{V_n}{N}, \quad (3.6)$$

де V_n – об'єм наважки, мм^3 ; N – кількість зернин в наважці, шт.



Рисунок 3.21 – Визначення об'єму наважки зерна пшениці

Для забезпечення точності та надійності результатів об'єм однієї зернівки кожної культури визначали тричі. Тобто процедуру зважування наважки, підрахунку кількості зернин у ній та визначення витісненого об'єму повторювали тричі окремо для кукурудзи, пшениці та ячменю. Кожен раз об'єм зануреної наважки фіксувався за зміною рівня рідини в мірному посуді після занурення зерна. Таким чином, отримували три незалежні значення об'єму однієї зернівки для кожної культури.

На завершальному етапі обчислювали середнє арифметичне з трьох отриманих значень для кожної культури. Саме це усереднене значення використовували в подальших розрахунках визначення еквівалентного діаметра зернівки. Такий підхід дозволяє мінімізувати вплив випадкових похибок і підвищити достовірність результатів дослідження.

Розрахунок еквівалентного діаметра проводили з використанням формули для діаметра кулі, що має такий самий об'єм, як і реальна зернина:

$$D_e = 1,24 \cdot \sqrt[3]{V_s}, \quad (3.7)$$

Визначення еквівалентного діаметра таким методом є простим, надійним та широко застосовуваним у аграрно-технологічних дослідженнях.

Таким чином встановлено, що еквівалентний діаметр зерна кукурудзи становить $7,6 \pm 0,2$ мм, пшениці – $4,1 \pm 0,2$ мм, а ячменю – $4,3 \pm 0,2$ мм.

У дослідженні для визначення оптимальних конструктивно-технологічних параметрів дискового подрібнювача концентрованих кормів була використана математична модель, яка описує залежність питомої енергоємності подрібнення, частки пилоподібної фракції та ступеня подрібнення від керованих факторів.

Для побудови та аналізу цих моделей було використано хмарне обчислювальне середовище Wolfram Cloud, що дозволило реалізувати точний чисельний аналіз складних регресійних рівнянь.

Методика полягала у використанні побудованих рівнянь регресії, які були одержані раніше на основі плану експерименту Бокса-Бенкена.

Згідно з проведеними дослідженнями і рекомендаціями щодо якості годівлі зазначено, що дрібніші часточки краще змішуються, утворюючи однорідний корм без сегрегації [45]. З іншого боку, надмірне подрібнення може мати негативні наслідки:

виникає багато пилоподібної фракції, що погіршує поїдання, може спричиняти респіраторні проблеми у тварин та призводить до злипань дрібних часток (особливо у вологому середовищі), утворення грудочок [72]. Тому важливо дотриматися оптимального ступеня подрібнення. Зокрема для свиней рекомендований розмір часток 0,2–1 мм [178, 168].

Використовуючи формулу (3.5) та враховуючи еквівалентний діаметр зернівок досліджуваних культур ми визначили, що для дотримання рекомендації щодо однорідності подрібненого зерна та уникнення утворення великої частки пилоподібної фракції, ступінь подрібнення повинен бути для кукурудзи в межах 7,2–9,4, а для пшениці і ячменя в межах 2–4.

Для комплексної оцінки було введено інтегральний критерій ефективності подрібнення і умова ступеня подрібнення:

$$\begin{cases} K = \frac{q - q_{\min}}{q_{\max} - q_{\min}} \frac{a - a_{\min}}{a_{\max} - a_{\min}} \rightarrow \min, \\ \lambda_{b\min} < \lambda < \lambda_{b\max}. \end{cases} \quad (3.8)$$

де $a_{\max}, a_{\min}, q_{\max}, q_{\min}$ – граничні значення частки пилоподібної фракції, питомої енергоємності та ступеня подрібнення, отримані в межах плану; $\lambda_{b\min}, \lambda_{b\max}$ – рекомендовані діапазони ступеня подрібнення зерна.

Отримані результати дають змогу рекомендувати вказані параметри як раціональні для подрібнення зерна в умовах використання дискового подрібнювача.

3.5 Методика експериментальних досліджень удосконаленого дискового подрібнювача

Після завершення експериментального етапу досліджень із використанням робочого органу базового дискового подрібнювача було здійснено оцінку впливу основних конструктивно-технологічних факторів – частоти обертання робочого диска n , зазору між дисками δ та подачі сировини G – на енергетичні та якісні показники роботи подрібнювача. Аналіз отриманих результатів дозволив встановити, що подача не має статистично значущого впливу на критерії оптимізації в межах досліджуваного

діапазону. Натомість зазор між дисками виявився значущим фактором, що впливає на питому енергоємність та на відповідність фракційного складу зоотехнічним вимогам. Враховуючи отримані показники фракційного складу було вирішено, що подальші дослідження розробленого робочого органу відбуватимуться за максимальної подачі та модульним зазором для кукурудзи 0,71 мм, пшениці – 0,72 мм, ячменя – 0,73 мм. Адже отриманий фракційний склад при мінімальному зазорі найкраще відповідав рекомендаціям з розміру часток подрібненого зерна для приготування комбикормів для свиней.

Узагальнення результатів чисельного моделювання дало змогу ідентифікувати додаткові фактори, які доцільно враховувати при подальшій модернізації конструкції робочого органу подрібнювача. Зокрема, було досліджено вплив кута встановлення ударних накладок β , кількості ударних накладок z на одному диску, а також частоти обертання n (табл. 3.3).

Таблиця 3.3 – Матриця плану експерименту удосконаленого дискового подрібнювача та рівні варіацій факторами

Рівні варіацій факторів, матриця дослідів	Фактори		
	Частота обертання диска n , об/хв	Кут встановлення ударних накладок β , °	Кількість ударних накладок z , шт.
	X_9	X_{11}	X_{10}
Верхній рівень (+)	3000	30	12
Основний рівень (0)	2250	20	9
Нижній рівень (-)	1500	10	6
Інтервал варіацій	750	10	3

Дослідження проводили при сталому значенні зазору між дисками $h = 0,6$ мм – саме це значення було раніше визначене як таке, що забезпечує найоптимальніший розмір подрібнених частинок відповідно до нормативів годівлі тварин. Подачу зерна було встановлено на максимальному рівні 1350 кг/год, що відповідає режиму інтенсивного навантаження, характерного для реальних умов експлуатації обладнання у виробничих господарствах. Планування експериментів здійснювалося

згідно з симетричним некомпозиційним планом другого порядку Бокса-Бенкена. Методика проведення випробувань у цій серії експериментів відповідала принципам, детально описаним у розділі 3.4.

3.6 Методика статистичної обробки експериментальних даних

Методика статистичної обробки експериментальних даних із використанням Wolfram Cloud передбачає автоматизоване виконання всіх етапів розрахунку – від побудови плану експерименту до оцінки адекватності моделі та візуалізації поверхні відгуку – із застосуванням вбудованих функцій Wolfram Cloud.

Для оптимізації обсягу досліджень застосовується симетричний некомпозиційний план другого порядку Бокса-Бенкена. Побудову матриці плану виконують за допомогою функції `DesignMatrix` з опцією `BoxBehnkenDesign`, що дозволяє сформувати план у кодованих координатах для заданої кількості факторів. Це знижує загальну кількість дослідів без втрати точності моделі. Після збору експериментальних даних формується модель регресії другого порядку за допомогою функції `LinearModelFit`, якій передається набір даних, поліном другого ступеня, та перелік незалежних змінних. У результаті обчислюються коефіцієнти регресії, їхні стандартні похибки, *t*-статистики і *p*-значення.

Перевірку однорідності дисперсій (тобто відтворюваності результатів) здійснюють шляхом обчислення дисперсій у межах повторюваних дослідів за допомогою функції `Variance`, далі визначають максимальну дисперсію (*Max*) та суму всіх дисперсій (*Total*) для розрахунку критерію Кохрена. Отримане значення порівнюється з табличним значенням критерію при обраному рівні значущості. Якщо умова виконується, результати вважаються однорідними.

Значущість коефіцієнтів регресії перевіряється за критерієм Стюдента, використовуючи таблицю параметрів, отриману з моделі через метод `fit[«ParameterTable»]`. Довірчі інтервали коефіцієнтів визначаються за допомогою `fit[«ParameterConfidenceIntervals»]`. Коефіцієнт вважається статистично значущим, якщо його абсолютне значення перевищує довірчу межу.

Оцінка адекватності отриманої моделі здійснюється за допомогою дисперсійного аналізу, який реалізовано в функції `fit[«ANOVATable»]`. Значення критерію Фішера розраховується як відношення дисперсії неадекватності до дисперсії відтворюваності. Якщо розраховане значення не перевищує табличного, гіпотезу про адекватність моделі приймають.

Після підтвердження статистичної надійності рівняння регресії здійснюється його розкодування. Для цього використовують аналітичні співвідношення, які враховують інтервали варіювання кожного з факторів, а заміна кодованих змінних на натуральні виконується з використанням виразів `ReplaceAll` або `Transform`.

Аналіз отриманої моделі ускладнюється наявністю взаємодій та квадратичних членів. Тому для спрощення аналізу і графічного представлення виконується канонічне перетворення рівняння, що передбачає обчислення похідних функції критерію оптимізації за всіма факторами ($D[Y, x_i]$) та визначення координат критичної точки (`Solve`). Далі будується матриця других похідних (гессіан), для якої визначаються власні значення та власні вектори за допомогою `Eigensystem`, що дозволяє здійснити поворот координат у нову систему. У результаті формується рівняння в канонічній формі, яке використовується для побудови тривимірної поверхні відгуку (`Plot3D`). Це дозволяє ідентифікувати раціональні зони значень досліджуваних факторів.

Для визначення оптимального значення критерію використовують функції `FindMaximum` або `FindMinimum`, які дозволяють знаходити координати та значення максимуму або мінімуму моделі у відповідному просторі факторів. Такий підхід забезпечує повноцінну реалізацію математичного моделювання процесу, підкріплену статистичною достовірністю та ефективною візуалізацією результатів. Застосування `Wolfram Cloud` значно підвищує ефективність обробки експериментальних даних завдяки автоматизації обчислень, точності реалізації статистичних методів і можливостям інтерактивної візуалізації.

4 РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ПРОЦЕСУ ПОДРІБНЕННЯ КОМПОНЕНТІВ КОНЦЕНТРОВАНИХ КОРМІВ

4.1 Результати лабораторних досліджень руйнування зерна при стиску

Отримані результати визначення основних геометричних параметрів та маси зернин трьох сільськогосподарських культур узагальнено в таблицях 4.1–4.3. Для кожної культури вказано мінімальні, максимальні, середні значення довжини, ширини, товщини та маси зернин, а також відповідні стандартні відхилення, які характеризують варіативність форми та маси.

Зерна гібрида кукурудзи П8816 (табл. 4.1) мають найбільші розміри серед досліджуваних культур. Середня довжина зернини становить $11,12 \pm 1,02$ мм, ширина – $8,09 \pm 0,88$ мм, а товщина – $4,73 \pm 0,85$ мм. Маса однієї зернини в середньому складає $0,28 \pm 0,06$ г. Розподіли кукурудзи за визначеними параметрами представлені на рисунку 4.1.

Таблиця 4.1 – Геометричні параметри та маса зернин гібрида кукурудзи П8816

Показник	Довжина, мм	Ширина, мм	Товщина, мм	Маса, г
Мінімальне	8,3	5,7	3,2	0,13
Максимальне	13,2	10,9	8,2	0,42
Середнє	11,12	8,09	4,73	0,28
Відхилення	1,02	0,88	0,85	0,06

Розподіл довжини зернин (рис. 4.1, а) кукурудзи має виражений симетричний характер, наближений до нормального. Основна маса значень зосереджена в межах 10–12 мм, що відповідає середньому значенню (11,12 мм). Наявність незначної асиметрії праворуч вказує на наявність окремих більших зернин, але загалом вибірка демонструє стабільність форми.

Гістограма ширини (рис. 4.1, б) також має форму, наближену до нормального розподілу, з помірною варіацією. Пік розподілу припадає на інтервал 7–9 мм, що

збігається із середнім значенням (8,09 мм). Розподіл є злегка асиметричним, з тенденцією до правостороннього відхилення.

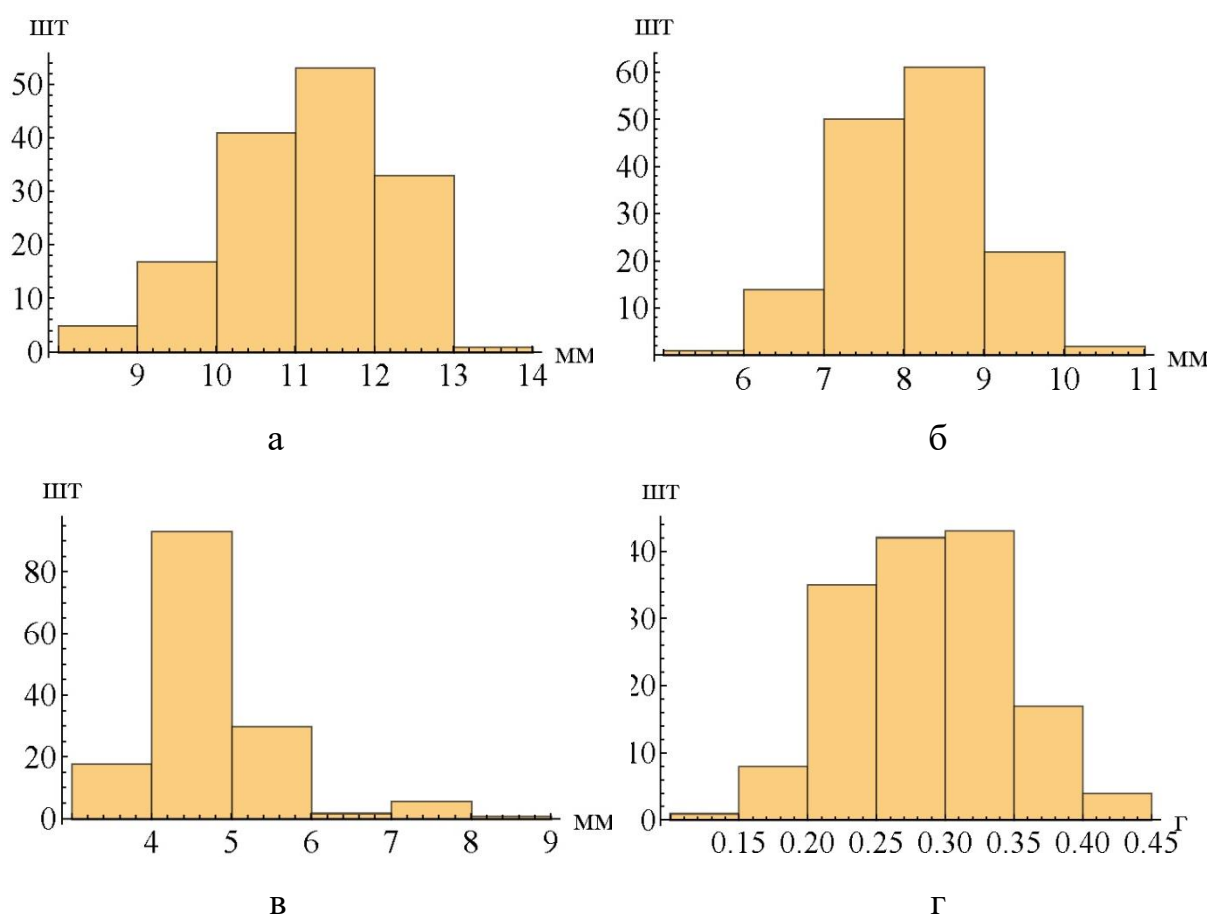


Рисунок 4.1 – Гістограми розподілу геометричних параметрів і маси зернин гібрида кукурудзи П8816: а – довжина; б – ширина; в – товщина; г – маса

На відміну від попередніх характеристик, розподіл товщини (рис. 4.1, в) має чітко виражену асиметрію зі зміщенням ліворуч. Основна маса зернин має товщину 4–5 мм. Це вказує на більшу варіативність за цим параметром та наявність частини зернин з істотно меншою товщиною.

Розподіл маси (рис. 4.1, г) є асиметричним з вираженим правостороннім нахилом. Більшість зернин мають масу в межах 0,2–0,35 г. Такий розподіл може бути зумовлений природною нерівномірністю щільності та наповненості зернин.

Зерна пшениці сорту «Патрас» (табл. 4.2) мають менші розміри за зерна кукурудзи. Середня довжина становить $6,7 \pm 0,63$ мм, ширина – $3,19 \pm 0,30$ мм, товщина – $2,89 \pm 0,25$ мм. Маса однієї зернини в середньому складає $0,045 \pm 0,005$ г. Це свідчить про компактну і відносно стабільну морфологію зерна пшениці. Розподіли пшениці за визначеними параметрами представлені на рисунку 4.2.

Таблиця 4.2 – Геометричні параметри зернин пшениці сорту «Патрас»

Показник	Довжина, мм	Ширина, мм	Товщина, мм	Маса, г
Мінімальне	5,3	2,5	2,4	0,0328
Максимальне	7,8	3,8	3,4	0,0576
Середнє	6,7	3,19	2,89	0,0454
Відхилення	0,63	0,30	0,25	0,0050

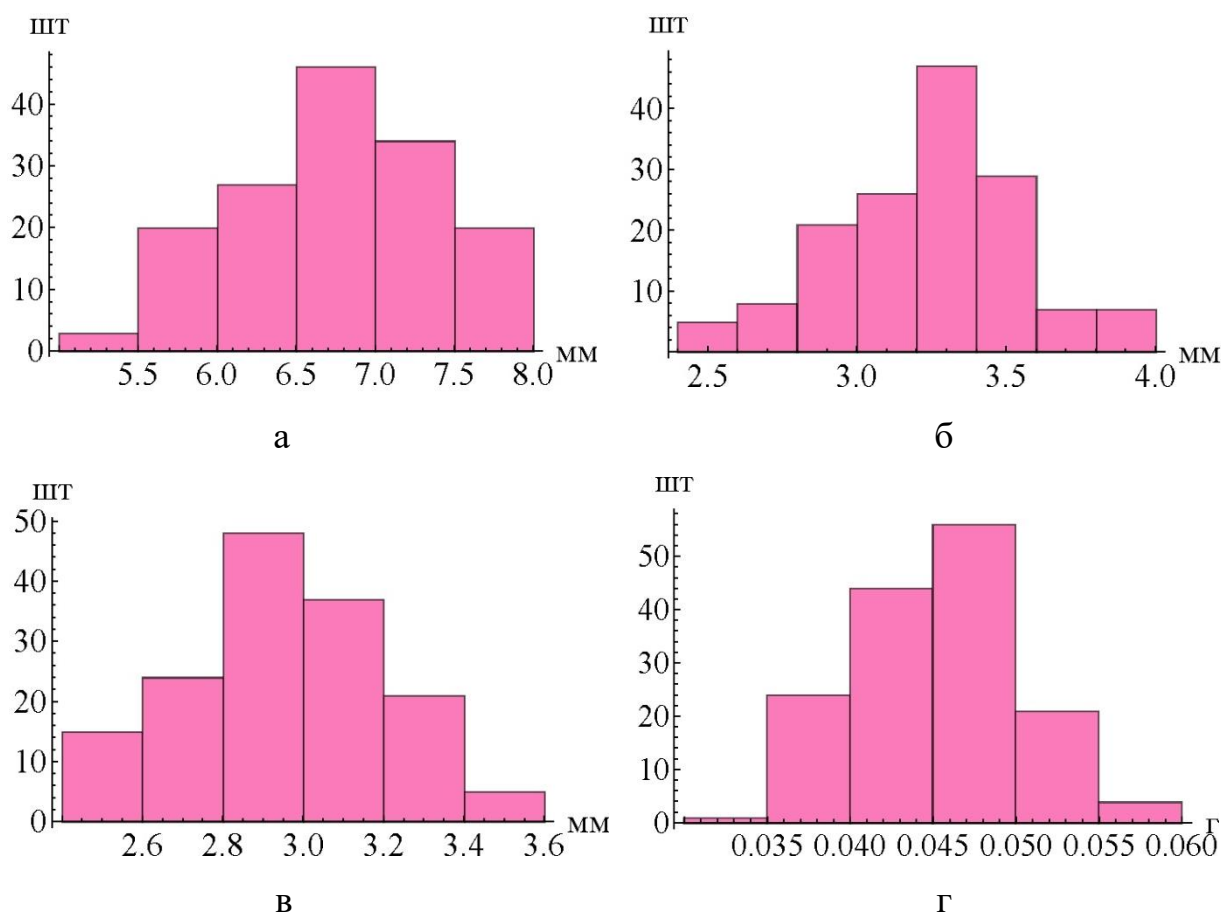


Рисунок 4.2 – Гістограми розподілу геометричних параметрів і маси пшениці сорту «Патрас»: а – довжина; б – ширина; в – товщина; г – маса

Розподіл довжини зернин пшениці (рис. 4.2, а) має форму, близьку до симетричного розподілу з незначним зміщенням у бік більших значень. Основна маса значень зосереджена в діапазоні 6,2–7,2 мм, що узгоджується з раніше встановленим середнім значенням 6,7 мм. Наявність піку в центрі розподілу свідчить про відносно стабільну морфологію зерна за довжиною.

Розподіл ширини зернин (рис. 4.2, б) має виражену асиметрію праворуч, з найбільшим числом спостережень у межах 3,2–3,4 мм. Такий тип розподілу є типовим для зерна з видовженою формою, де ширина змінюється вужче, ніж довжина.

Товщина зернин (рис. 4.2, в) розподілена близько до нормального розподілу та має концентрацію значень у межах 2,8–3,2 мм. Це свідчить про те, що більшість зернин мають типовий поперечний переріз, характерний для сортів пшениці. Зменшення частоти в крайніх значеннях також вказує на стабільну однорідність дослідженого сорту.

Зерно ячменю сорту «Снігова Королева» (табл. 4.3) має середню довжину $9,31 \pm 0,21$ мм, ширину – $3,49 \pm 0,13$ мм, товщину – $2,79 \pm 0,10$ мм. Маса однієї зернини в середньому складає $0,0356 \pm 0,0047$ г. Відхилення геометричних параметрів є найменшими серед досліджуваних культур, що вказує на високу однорідність форми і структури ячмінного зерна. Така стабільність є важливою при моделюванні, оскільки дозволяє використовувати усереднені параметри з мінімальним ризиком втрати точності. Розподіли ячменю за визначеними параметрами представлені на рисунку 4.3.

Таблиця 4.3 – Геометричні параметри зернин ячменю сорту «Снігова Королева»

Показник	Довжина, мм	Ширина, мм	Товщина, мм	Маса, г
Мінімальне	8,7	3,1	2,5	0,0258
Максимальне	9,8	3,8	3	0,0468
Середнє	9,31	3,49	2,79	0,0356
Відхилення	0,21	0,13	0,10	0,0047

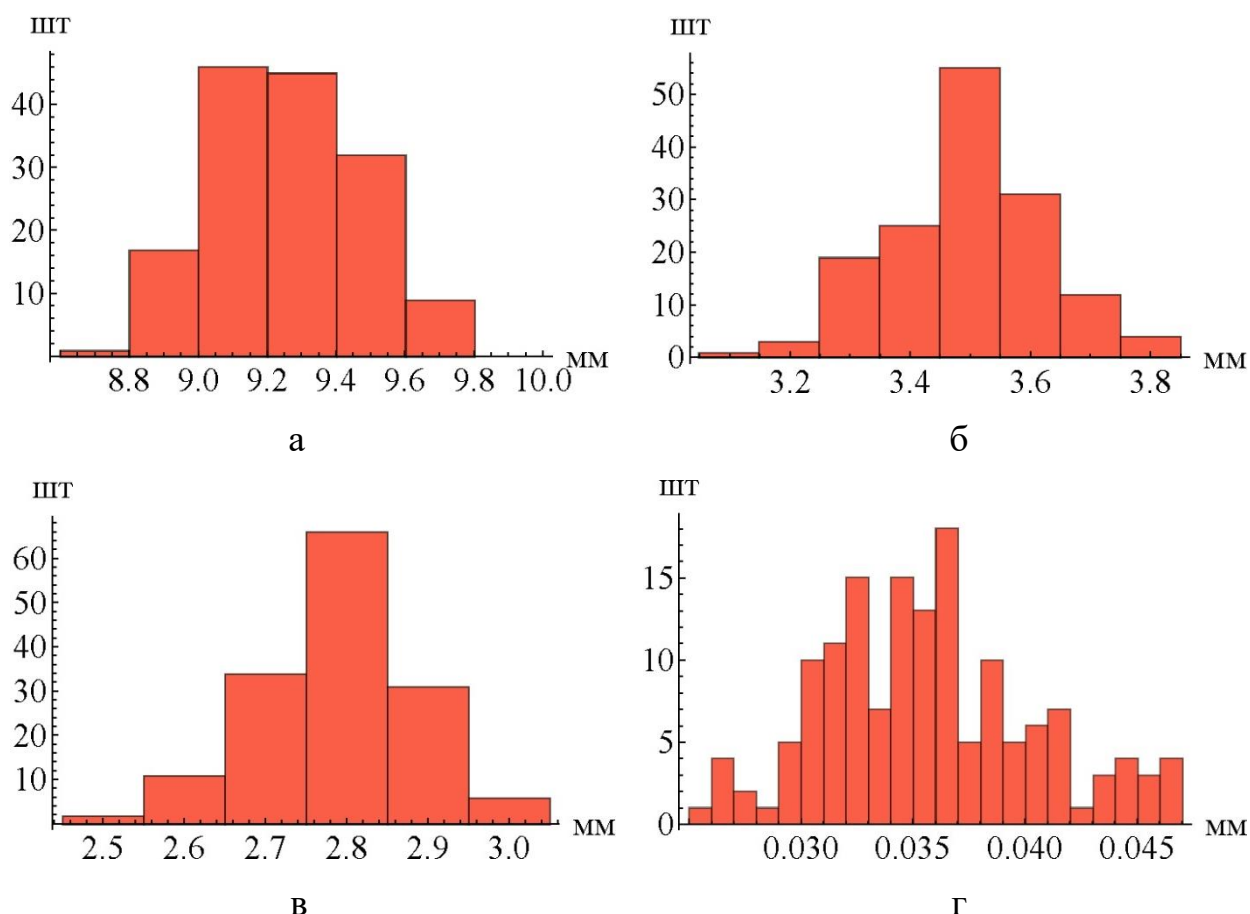


Рисунок 4.3 – Гістограми розподілу геометричних параметрів і маси ячменю сорту «Снігова Королева»: а – довжина; б – ширина; в – товщина; г – маса

Розподіл довжини зернин ячменю (рис. 4.3, а) є симетричним і має форму, близьку до нормального. Основна частина значень сконцентрована в межах 9–9,6 мм, що відповідає середньому значенню 9,31 мм. Це вказує на незначну варіативність довжини, що підтверджується низьким стандартним відхиленням (0,21 мм).

Розподіл ширини (рис. 4.3, б) є асиметричним з вираженим правим нахилом. Більшість зернин мають ширину в межах 3,45–3,55 мм. І хоча спостерігається окреме збільшення кількості вузких зернин, загальний характер розподілу свідчить про стабільність геометрії за цим параметром, з відхиленням лише 0,13 мм.

Розподіл товщини (рис. 4.3, в) демонструє виражений пік у діапазоні 2,75–2,85 мм, що збігається із середнім значенням 2,79 мм. Асиметрія слабо виражена, варіація

мінімальна (відхилення – 0,10 мм), що вказує на найвищу однорідність саме за цим параметром серед усіх досліджених культур.

Результати проведеного дослідження сили руйнування представлені в таблицях 4.1–4.3, рисунках 4.1–4.3.

У горизонтальному положенні середнє значення сили руйнування досягло 363,1 Н. Стандартне відхилення по силі становило 187,5 Н. Аналіз кореляцій показав, що найбільший негативний зв'язок з силою руйнування ($r = -0,56$) має висота зернини, тобто зі зростанням товщини знижується стійкість до руйнування. Довжина та ширина мали слабку позитивну кореляцію.

У положення на бічній поверхні спостерігається зниження сили руйнування до середнього рівня 163,95 Н. Найвища позитивна кореляція спостерігалась між вагою та міцністю ($r = 0,32$), а також довжиною ($r = 0,30$). Натомість висота майже не впливала на силу руйнування ($r = -0,05$), що свідчить про зміну характеру передачі навантаження в іншій площині.

У вертикальному положенні сила руйнування становила в середньому 169,36 Н. Кореляційний аналіз показав майже повну відсутність лінійного зв'язку між геометрією та міцністю: усі коефіцієнти перебувають у межах $\pm 0,20$. Це свідчить про те, що в такій орієнтації вплив геометрії зерна на його стійкість до стискання є мінімальним.

Таблиця 4.4 – Сила руйнування зернин гібрида кукурудзи П8816, Н

Положення	Горизонтальне	На бічній поверхні	Вертикальне
Мінімальне	67,48	58,23	78,57
Максимальне	723,82	337,55	259,94
Середнє	363,09	142,74	169,36
Відхилення	187,53	55,18	50,35

Гістограми, представлені на рис. 4.4, ілюструють варіативність сили руйнування в кожному з трьох положень. Розподіл для горизонтального положення має асиметричну форму з правим нахилом, що вказує на наявність зернин з дуже

високою міцністю. У випадках бічного і вертикального навантаження розподіли більш симетричні, однак із концентрацією в межах 100–200 Н, що підтверджує статистичні висновки про нижчий рівень міцності порівняно з горизонтальним положенням.

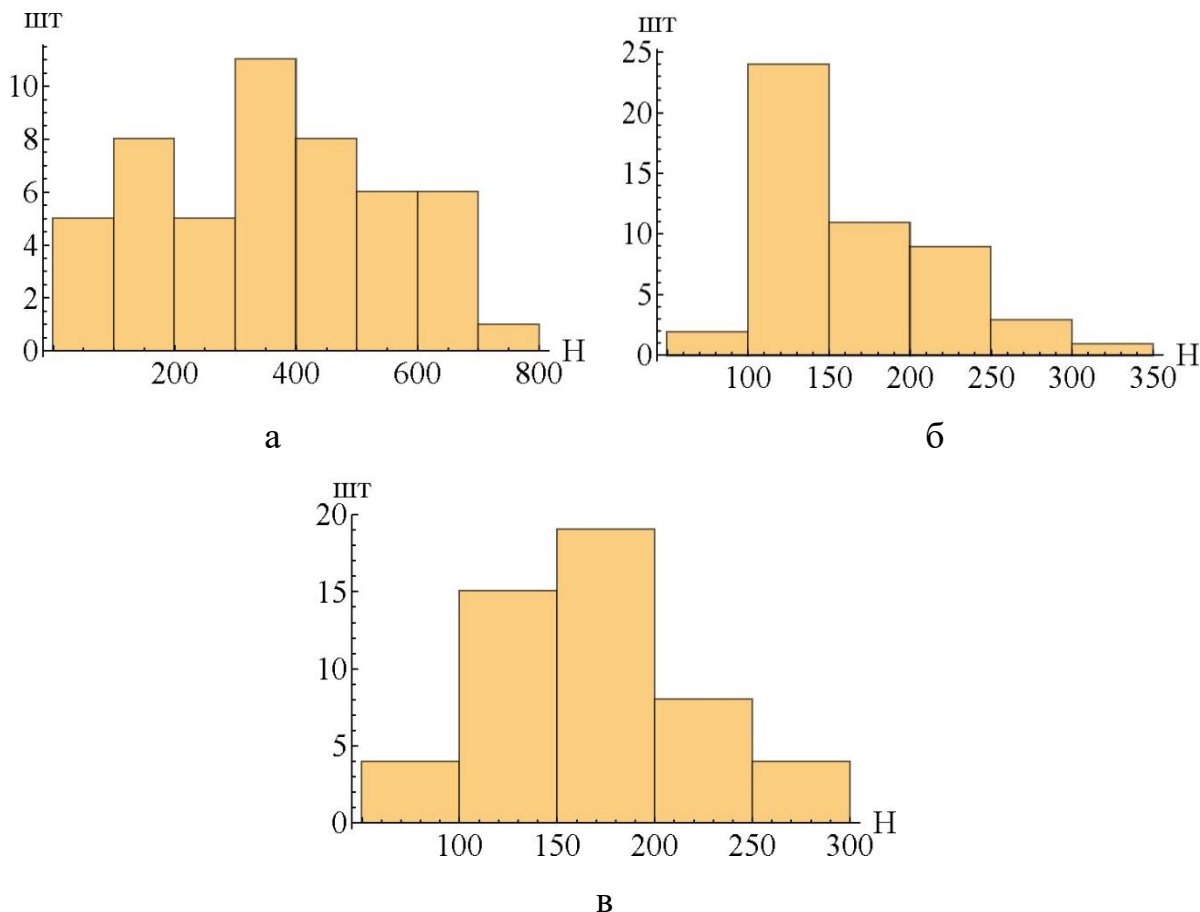


Рисунок 4.4 – Гістограми розподілу сили руйнування зернин гібрида кукурудзи П8816 у різних просторових положеннях: а – горизонтальне положення; б – на бічній поверхні; в – вертикальне положення

При дослідженні зерна пшениці (табл. 4.5) в вертикальному положенні сила руйнування досягала в середньому 147,73 Н при стандартному відхиленні 53,24 Н. Кореляційний аналіз показав слабкий позитивний зв'язок сили руйнування з довжиною ($r = 0,20$), шириною ($r = 0,18$) та товщиною ($r = 0,10$), що вказує на незначний вплив геометричних параметрів на міцність у цьому положенні.

У положення зернини на бічній поверхні середня сила руйнування була трохи вищою – 155,09 Н, зі зменшеним стандартним відхиленням 47,73 Н. Водночас

спостерігається посилення кореляційних зв'язків для довжини ($r = 0,34$), ширини ($r = 0,41$) та товщини ($r = 0,38$). Це свідчить про те, що при навантаженні зерна на бічну поверхню геометрія має вагомий вплив на його міцнісні характеристики. Особливо важливою виявилася ширина зернини, що пов'язано з площею контакту під час стискання.

Найбільшу середню силу руйнування було зафіксовано у горизонтальному положенні – 267,33 Н, незважаючи на те, що геометричні розміри залишалися наближеними до інших положень. Кореляційний аналіз показав, що сила руйнування має найвищу залежність від ширини ($r = 0,48$) та довжини ($r = 0,40$), тоді як товщина має незначний вплив ($r = 0,09$).

Таблиця 4.5 – Сила руйнування зернин пшениці сорту «Патрас», Н

Положення	Горизонтальне	На бічній поверхні	Вертикальне
Мінімальне	141,5	70,01	43,29
Максимальне	393,81	251,29	293,46
Середнє	267,33	155,09	147,73
Відхилення	44,04	47,73	53,24

Гістограми (рис. 4.5) демонструють характерні відмінності у формі розподілу сили руйнування зерна пшениці. У вертикальному положенні розподіл є асиметричним з концентрацією в діапазоні 100–150 Н. Для бічного положення розподіл симетричніший (100–200 Н). Зсув вправо та пік у зоні 250–300 Н спостерігається у горизонтальному положенні, що підтверджує вищу міцність при навантаженні перпендикулярно осі зернини.

Середня сила руйнування зерна ячменю у вертикальному положенні становила 101,26 Н (табл. 4.6). Стандартне відхилення сили руйнування – 13,41 Н. Найвищий коефіцієнт кореляції ($r = 0,12$) спостерігається між довжиною і міцністю, тоді як ширина має зворотний зв'язок ($r = -0,16$), а товщина – майже нульовий ($r = 0,03$). Такий результат свідчить про слабкий вплив геометрії на міцність у цьому положенні,

що також підтверджується відносно симетричним і вузьким розподілом на гістограмі (рис. 4.6).

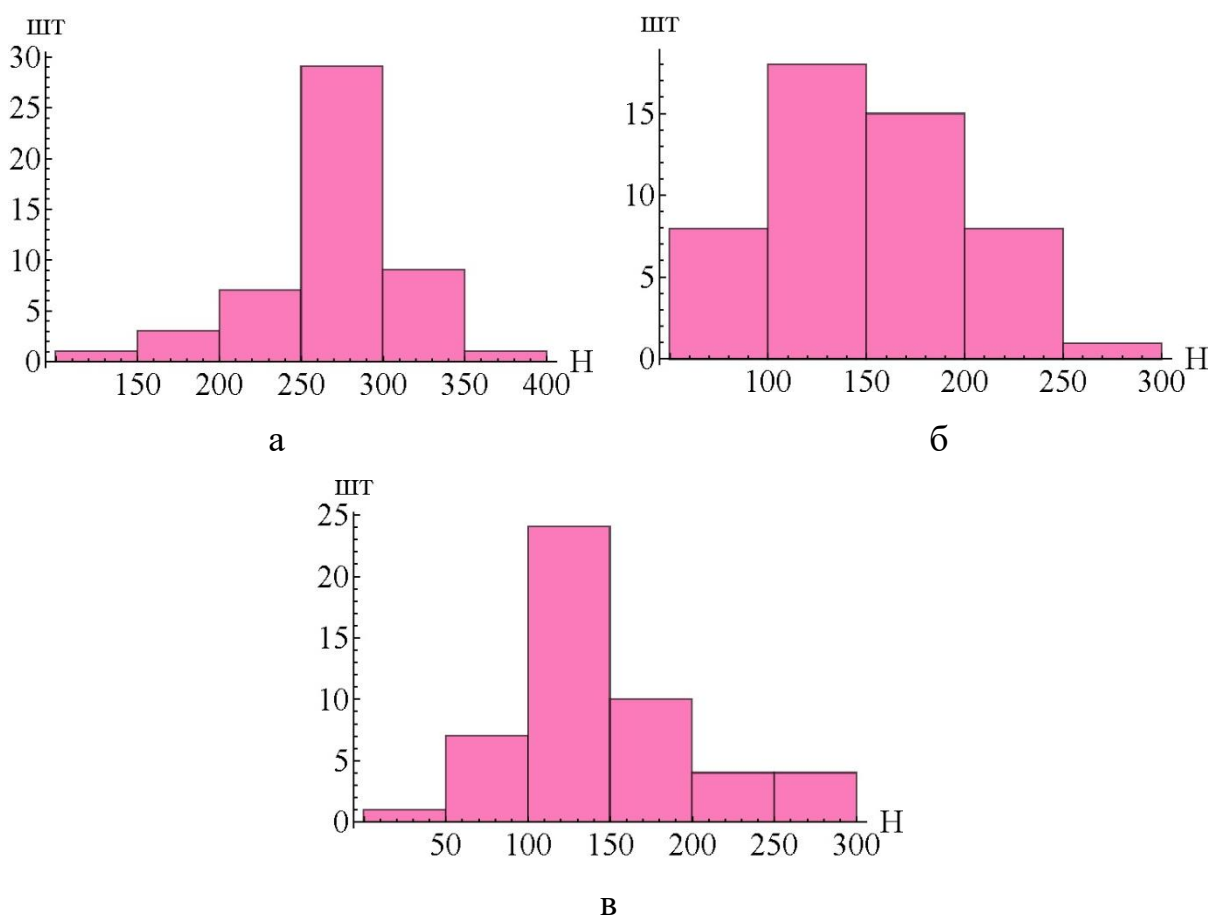


Рисунок 4.5 – Гістограми розподілу сили руйнування зернин пшениці сорту «Патрас» у різних просторових положеннях: а – горизонтальне положення; б – на бічній поверхні; в – вертикальне положення

У положенні на бічній поверхні сила руйнування зросла до 132,87 Н, з більшим розкидом значень (стандартне відхилення 25,99 Н). Середні геометричні параметри практично не змінились. Спостерігалася найбільша варіативність у значеннях сили руйнування, що відображено у ширшому й більш асиметричному розподілі. У цьому положенні кореляція між довжиною і міцністю була від'ємною ($r = -0,35$), що вказує на зменшення сили руйнування зі зростанням довжини. Позитивні зв'язки із шириною та товщиною ($r = 0,27$ для обох) свідчать про те, що площа контакту в поперечному перерізі має вплив на опір стисканню.

Найбільшу силу руйнування зафіксовано у горизонтальному положенні – 270,23 Н при стандартному відхиленні 32,43 Н. Геометричні параметри залишилися в межах попередніх середніх значень, що свідчить про збереження стабільної морфології. Коефіцієнт кореляції з довжиною ($r = -0,25$) і товщиною ($r = -0,15$) негативні, а з шириною – позитивний ($r = 0,18$).

Таблиця 4.6 – Сила руйнування зернин ячменю сорту «Снігова Королева», Н

Положення	Горизонтальне	На бічній поверхні	Вертикальне
Мінімальне	209,45	70,03	77,28
Максимальне	341,8	194,05	140,8
Середнє	270,23	132,87	101,26
Відхилення	32,43	25,99	13,41

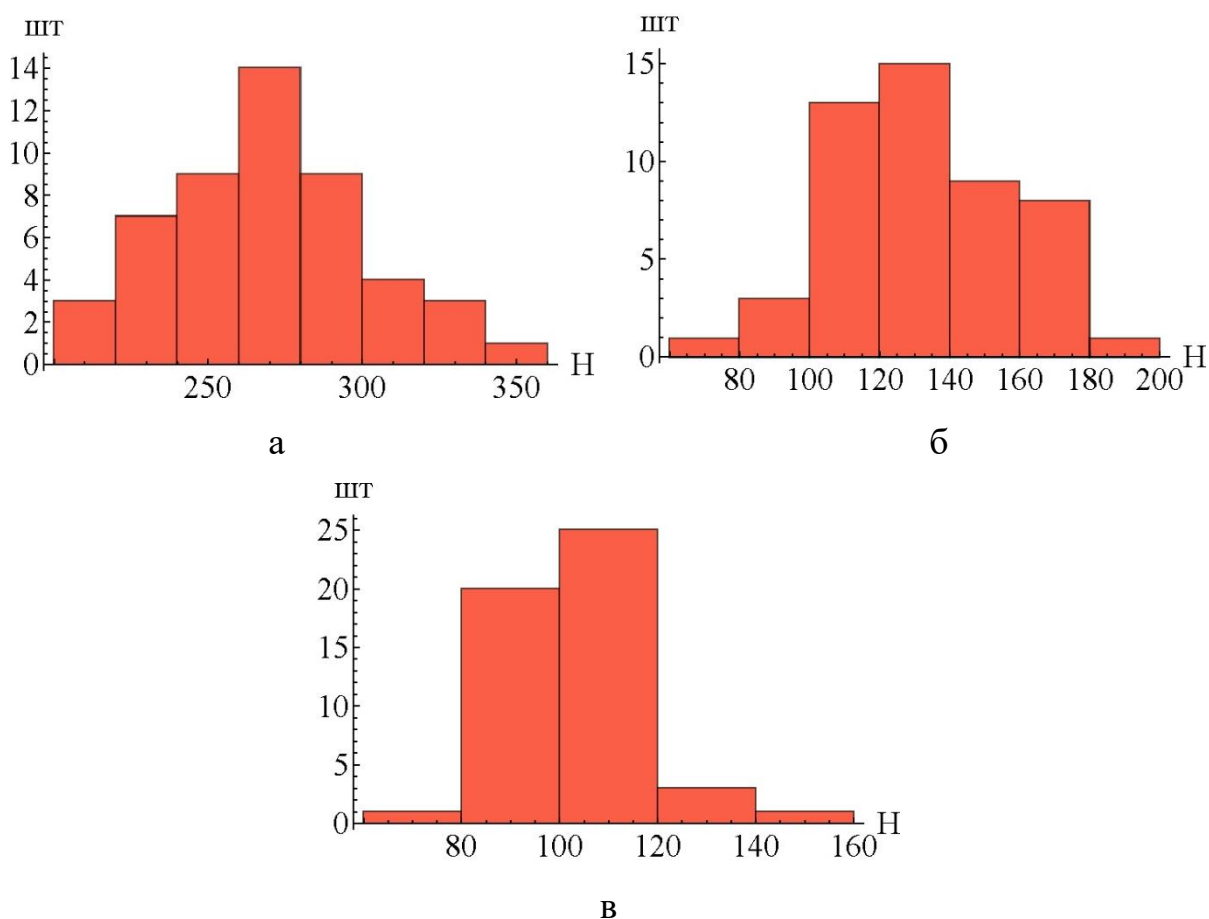


Рисунок 4.6 – Гістограми розподілу сили руйнування зернин зерна ячменю сорту «Снігова Королева» у різних просторових положеннях: а – горизонтальне положення; б – на бічній поверхні; в – вертикальне положення

На рисунку 4.6 зображено гістограми сили руйнування зерна ячменю. У вертикальному положенні розподіл є вузьким, зі скупченням значень у межах 80–120 Н, що свідчить про високу однорідність міцнісних характеристик. Бічне положення характеризується ширшим і менш симетричним розподілом з піком у зоні 120–140 Н, що вказує на більшу варіативність результатів і чутливість до геометрії зерна. У горизонтальному положенні спостерігається найвища сила руйнування (середнє значення – 270 Н) та чітко виражений пік у межах 260–280 Н.

4.2 Результати експериментальних досліджень базового дискового подрібнювача

У результаті проведених експериментальних досліджень були визначені основні показники ефективності та якості процесу подрібнення зерна кукурудзи, пшениці та ячменю.

Перед подрібненням було зафіксовано вологість зернового матеріалу: для кукурудзи вона становила $12,3 \pm 0,2\%$, для пшениці – $11,3 \pm 0,2\%$, а для ячменю – $10,7 \pm 0,2\%$. Ці значення відповідають вимогам щодо безпечного зберігання та достовірного проведення механічних випробувань.

Усереднені результати досліджень щодо продуктивності подрібнення, питомої енергоємності, фракційного складу та ступеня подрібнення зведено у додатку Д, що дає змогу порівняти ефективність роботи дискового подрібнювача залежно від виду оброблюваного зерна. Значення розрахованого критерію Кохрена наведено в таблиці 4.7. Оскільки у всіх випадках максимальне значення розрахованого критерію Кохрена не перевищує табличного значення ($G_{\max} < G_{\text{табл}} = 0,3346$), можна зробити висновок про однорідність дисперсій результатів експерименту за всіма показниками та культурами. Це означає, що дисперсії варіант достатньо близькі між собою, і можна переходити до подальшої статистичної обробки, зокрема розрахунку коефіцієнтів рівняння регресії та оцінювання їх значущості.

У результаті статистичної обробки експериментальних даних було побудовано математичні моделі питомої енергоємності для зернин кукурудзи, пшениці та ячменю

залежно від трьох факторів: подачі сировини в камеру подрібнення, величини зазору між дисками та частоти обертання диска.

Таблиця 4.7 – Значення розрахованого критерію Кохрена для результатів дослідження базового дискового подрібнювача

Продуктивність Q, кг/год	Потужність P, Вт	Частка пилоподібної фракції a, %	Модуль подрібнення M, мм
Табличне значення критерію Кохрена ($G_{\text{табл}} = 0,3346$)			
Подрібнення кукурудзи			
0,2178	0,3122	0,1844	0,1601
Подрібнення пшениці			
0,2769	0,2987	0,2363	0,273
Подрібнення ячменю			
0,2992	0,2889	0,3249	0,3003

Експериментальні дані (додаток Д) було опрацьовано із застосуванням хмарного сервісу Wolfram Cloud, що забезпечило можливість якісного й оперативного математичного аналізу результатів. У ході обробки побудовано регресійні моделі в закодованому вигляді, які описують залежність питомої енергоємності процесу подрібнення зерна кукурудзи, пшениці та ячменю від обраних факторів.

Питома енергоємність при подрібненні:

– кукурудзи:

$$q^c = 4,67697 - 0,55408x_7 + 0,0616528x_7^2 - 1,2532x_8 + 0,549927x_7x_8 - 0,0541978x_8^2 + 0,056219x_9 - 0,380414x_7x_9 + 0,305566x_8x_9 - 1,01904x_9^2; \quad (4.1)$$

– пшениці:

$$q^w = 3,95945 - 0,420206x_7 + 0,356328x_7^2 - 1,40091x_8 + 0,0377587x_7x_8 + 0,463289x_8^2 - 0,331336x_9 - 0,368908x_7x_9 + 0,307871x_8x_9 - 1,06659x_9^2; \quad (4.2)$$

– ячменя:

$$q^b = 7,89442 - 1,05066x_7 + 0,719266x_7^2 - 2,62496x_8 + 0,114191x_7x_8 + 0,835506x_8^2 - 0,760391x_9 - 0,746428x_7x_9 + 0,524279x_8x_9 - 2,06311x_9^2. \quad (4.3)$$

Статистична обробка рівнянь (4.1)–(4.3) приведені в таблиці 4.8.

Таблиця 4.8 – Результати статистичної обробки рівняння (4.1)–(4.3) питомої енергоємності

Коефі- цієнт	Значен- ня	По- хибка	Коефіцієнт Стьюдента	Рівень значущості	Дисперсійний аналіз	
При подрібненні кукурудзи (4.1)						
k ₀₀	4,67697	0,410	11,3812	0,000091644	Сума квадратів відхилень	
k ₇₀	–0,5541	0,252	–2,2018	0,0789147	Модель	277,894
k ₈₀	–1,2532	0,252	–4,97996	0,00417585	Помилка	2,53308
k ₉₀	0,05622	0,252	0,223403	0,832062	Оцінка дисперсії	
k ₇₈	0,54993	0,356	1,54524	0,182949	Модель	27,7894
k ₇₉	–0,3804	0,356	–1,06892	0,33397	Помилка	0,506615
k ₈₉	0,30557	0,356	0,858609	0,429785	Критерій Фішера	
k ₇₇	0,06165	0,370	0,166442	0,874331		
k ₈₈	–0,0542	0,370	–0,146316	0,889388	Розраховане	54,8531
k ₉₉	–1,0190	0,370	–2,75106	0,0402594	Табличне	2,21
При подрібненні пшениці (4.2)						
k ₀₀	3,95945	0,297	13,3475	0,000042221	Сума квадратів відхилень	
k ₇₀	–0,4202	0,187	–2,3132	0,0686332	Модель	244,594
k ₈₀	–1,4009	0,187	–7,71187	0,000585171	Помилка	1,31995
k ₉₀	–0,3313	0,187	–1,82397	0,127754	Оцінка дисперсії	
k ₇₈	0,03776	0,257	0,146978	0,888892	Модель	24,4594
k ₇₉	–0,3689	0,257	–1,436	0,210489	Помилка	0,263991
k ₈₉	0,30787	0,257	1,19841	0,284458	Критерій Фішера	
k ₇₇	0,35633	0,267	1,33262	0,240158		
k ₈₈	0,46329	0,267	1,73263	0,143703	Розраховане	92,6524
k ₉₉	–1,0666	0,267	–3,9889	0,0104378	Табличне	2,21
При подрібненні ячменю (4.3)						
k ₀₀	7,89442	0,613	12,8789	0,000050265	Сума квадратів відхилень	
k ₇₀	–1,0507	0,375	–2,799	0,0380385	Модель	965,5
k ₈₀	–2,625	0,375	–6,99302	0,000920963	Помилка	5,63606
k ₉₀	–0,7604	0,375	–2,02572	0,0986482	Оцінка дисперсії	
k ₇₈	0,11419	0,531	0,215109	0,838181	Модель	96,55
k ₇₉	–0,7464	0,531	–1,4061	0,218694	Помилка	1,12721
k ₈₉	0,52428	0,531	0,987619	0,368691	Критерій Фішера	
k ₇₇	0,71927	0,553	1,30177	0,249739		
k ₈₈	0,83551	0,553	1,51215	0,1909	Розраховане	85,654
k ₉₉	–2,0631	0,553	–3,73396	0,0135156	Табличне	2,21

Значущість моделей підтверджена високими значеннями критерію Фішера ($F_{\text{розра.}}$ значно перевищує $F_{\text{табл.}}$ для всіх трьох культур), що свідчить про адекватність моделей реальному процесу.

Підставляючи в рівняння (4.1)–(4.3) без урахування незначущих коефіцієнтів за t-критерієм Стюдента замість x_i вирази для факторів досліджень в явному вигляді отримуємо залежність питомої енергоємності від факторів досліджень в розкодованому вигляді:

– кукурудза:

$$q^c = -1,0887 + 0,00815232n - 1,81163 \cdot 10^{-6}n^2 - 0,00123129G - 2,08867\delta; \quad (4.4)$$

– пшениця:

$$q^w = -2,23111 + 0,00853272n - 1,89616 \cdot 10^{-6}n^2 - 0,000933791G - 2,33485\delta; \quad (4.5)$$

– ячмінь:

$$q^b = -3,75982 + 0,0165049n - 3,66775 \cdot 10^{-6}n^2 - 0,0023348G - 4,37493\delta. \quad (4.6)$$

Графічна інтерпретація залежностей (4.4)–(4.6) представлена на рис. 4.7.

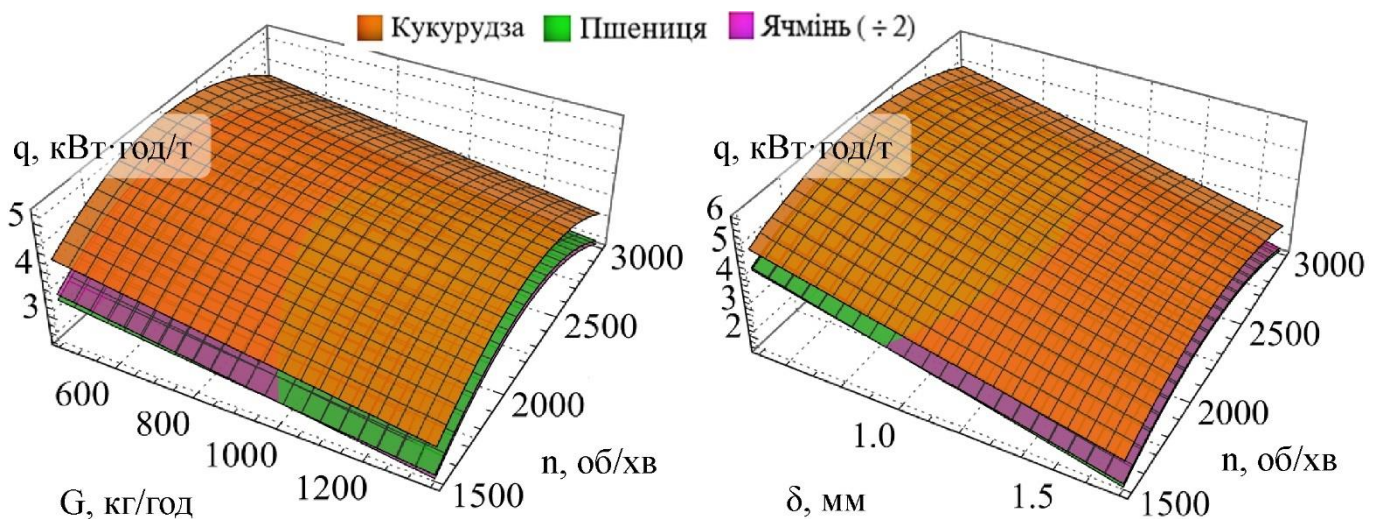


Рисунок 4.7 – Залежність питомої енергоємності подрібнення зерна q від подачі G , модульного зазору між дисками δ та частоти обертання диска n

На основі побудованих графічних залежностей встановлено, що найбільше значення питомої енергоємності спостерігається при подрібненні зерна ячменю.

Аналіз впливу досліджуваних факторів показав, що найменший вплив на значення питомої енергоємності має подача зерна в камеру подрібнення. Зміна цього параметра в межах експерименту призводить до помірних змін. При досліджених рівнях подачі вона більше впливає на продуктивність, ніж на витрачену потужність, що відображається в зниженні питомої енергоємності зі збільшенням подачі.

Помірний вплив спостерігається від частоти обертання диска. При частоті 2250 об/хв фіксується максимальне значення питомої енергоємності для всіх культур, що, ймовірно, пов'язано з резонансними або турбулентними ефектами у міждисковому просторі. За таких умов підвищується інтенсивність зіткнень частинок із робочими органами та між собою, зростає швидкість деформації зерна, а отже – і втрати енергії на створення нових поверхонь розлому, тертя та звукові коливання.

Найбільший вплив на питому енергоємність має модульний зазор між дисками. Встановлено чітку закономірність: зі збільшенням зазору питомі енерговитрати зменшуються. Це пояснюється зменшенням ступеня деформації зерна при подрібненні. У вузькому зазорі зерно зазнає інтенсивнішого контактного навантаження, що призводить до більшого обсягу пластичних і крихких деформацій. Оскільки більша частина енергії витрачається на подолання міцності матеріалу та перетворюється в теплоту, питомі витрати енергії зростають. При ширшому зазорі переважає механізм часткового розколювання та розшарування зерна, що вимагає менших енергетичних витрат. Отже, зазор між дисками виступає ключовим регулятором інтенсивності контактної взаємодії, яка визначає ефективність руйнування зерна як пружно-крихкого тіла.

Аналогічний підхід статистичної обробки було застосовано для побудови регресійних моделей, які описують залежність частки пилоподібної фракції (часток діаметром до 0,2 мм), утвореної в результаті подрібнення зерна кукурудзи, пшениці та ячменю, від варійованих технологічних факторів. Це дозволило кількісно оцінити вплив кожного з факторів на утворення занадто дрібних частинок та визначити умови, за яких їх кількість мінімізується.

Частка пилоподібної фракції в подрібненій масі:

– кукурудзи:

$$a^c = 8,51281 + 2,36786x_7 + 2,63125x_7^2 - 4,38814x_8 + 0,083335x_7x_8 + 0,677607x_8^2 + 1,69814x_9 + 0,339049x_7x_9 - 0,400557x_8x_9 - 0,656126x_9^2; \quad (4.7)$$

– пшениці:

$$a^w = 1,88515 + 0,847239x_7 + 0,954697x_7^2 - 2,52559x_8 - 0,193185x_7x_8 + 1,355x_8^2 + 0,992759x_9 + 0,0185079x_7x_9 - 0,163968x_8x_9 - 0,369123x_9^2; \quad (4.8)$$

– ячменю:

$$a^b = 1,4671 + 0,3801x_7 + 0,637621x_7^2 - 1,43774x_8 - 0,0963665x_7x_8 + 0,640149x_8^2 + 0,688391x_9 + 0,167834x_7x_9 - 0,0754055x_8x_9 - 0,153184x_9^2. \quad (4.9)$$

Статистична обробка рівнянь (4.7)–(4.9) приведена в таблиці 4.9.

Таблиця 4.9 – Результати статистичної обробки рівняння (4.7)–(4.9) частки пилоподібної фракції в подрібненій масі

Коефіцієнт	Значення	Похибка	Коефіцієнт Стьюдента	Рівень значущості	Дисперсійний аналіз	
При подрібненні кукурудзи (4.7)						
k ₀₀	8,51281	0,66	12,9017	0,000049832	Сума квадратів відхилень	
k ₇₀	2,36786	0,404	5,86023	0,00205098	Модель	1730,83
k ₈₀	–4,3881	0,404	–10,8602	0,000114932	Помилка	6,53043
k ₉₀	1,69814	0,404	4,20273	0,00846724	Оцінка дисперсії	
k ₇₈	0,08334	0,571	0,145838	0,889746	Модель	173,083
k ₇₉	0,33905	0,571	0,593345	0,578771	Помилка	1,30609
k ₈₉	–0,4006	0,571	–0,700986	0,514584	Критерій Фішера	
k ₇₇	2,63125	0,595	4,4241	0,00686569		
k ₈₈	0,67761	0,595	1,13931	0,306197	Розраховане	132,52
k ₉₉	–0,6561	0,595	–1,10319	0,320189	Табличне	2,21
При подрібненні пшениці (4.8)						
k ₀₀	1,88515	0,465	4,05458	0,00978114	Сума квадратів відхилень	
k ₇₀	0,84724	0,285	2,9757	0,0309529	Модель	203,352
k ₈₀	–2,5256	0,285	–8,87046	0,000302818	Помилка	3,2426
k ₉₀	0,99276	0,285	3,4868	0,0175304	Оцінка дисперсії	
k ₇₈	–0,1932	0,403	–0,479778	0,651637	Модель	20,3352
k ₇₉	0,01851	0,403	0,0459649	0,965118	Помилка	0,648519
k ₈₉	–0,164	0,403	–0,40722	0,700694	Критерій Фішера	
k ₇₇	0,9547	0,419	2,278	0,0717176		
k ₈₈	1,355	0,419	3,23316	0,0231245	Розраховане	31,3563

Коефі- цієнт	Значен- ня	По- хибка	Коефіцієнт Стюдента	Рівень значущості	Дисперсійний аналіз	
k ₉₉	-0,3691	0,419	-0,880762	0,418764	Табличне	2,21
При подрібненні ячменю (4.9)						
k ₀₀	1,4671	0,27	5,43779	0,00285389	Сума квадратів відхилень	
k ₇₀	0,3801	0,165	2,30062	0,0697181	Модель	88,7579
k ₈₀	-1,4377	0,165	-8,7022	0,000331587	Помилка	1,09185
k ₉₀	0,68839	0,165	4,16662	0,00876772	Оцінка дисперсії	
k ₇₈	-0,0964	0,234	-0,412438	0,697106	Модель	8,87579
k ₇₉	0,16783	0,234	0,718311	0,504721	Помилка	0,218371
k ₈₉	-0,0754	0,234	-0,322728	0,75996	Критерій Фішера	
k ₇₇	0,63762	0,243	2,62189	0,0469904		
k ₈₈	0,64015	0,243	2,63228	0,0464054	Розраховане	40,6455
k ₉₉	-0,1532	0,243	-0,629891	0,556425	Табличне	2,21

Значущість моделей підтверджена високими значеннями критерію Фішера ($F_{\text{розн.}} \text{ перевищує } F_{\text{табл.}}$ для всіх трьох культур), що свідчить про адекватність моделей реальному процесу.

Підставляючи в рівняння (4.7)–(4.9) без урахування незначущих коефіцієнтів за t-критерієм Стюдента замість x_i вирази для факторів досліджень в явному вигляді отримуємо залежність частки пилоподібної фракції від факторів досліджень в розкодованому вигляді:

– кукурудза:

$$a^c = 17,2526 - 0,018127G + 0,0000129938G^2 + 0,00226419n - 7,31357\delta; \quad (4.10)$$

– пшениця:

$$a^w = 10,2157 - 0,00660344G + 4,71455 \cdot 10^{-6}G^2 + 0,00132368n - 12,4899\delta + 3,76389\delta^2; \quad (4.11)$$

– ячмінь:

$$a^b = 5,97968 - 0,00482308G + 3,14875 \cdot 10^{-6}G^2 + 0,000917855n - 6,30826\delta + 1,77819\delta^2. \quad (4.12)$$

Графічна інтерпретація залежностей (4.10)–(4.12) представлена на рис. 4.8.

Зі створених поверхонь відгуків можемо зробити висновок, що найбільше часток діаметром менше 0,2 мм було утворено при подрібненні кукурудзи. Це пояснюється меншою твердістю та структурною крихкістю зерна кукурудзи порівняно з іншими культурами, що сприяє інтенсивнішому руйнуванню при дії ударних і стискаючих зусиль. При подрібненні кукурудзи відбувається легше

відшарування зовнішніх оболонок і подальше подрібнення ендосперму до стану пилоподібної маси.

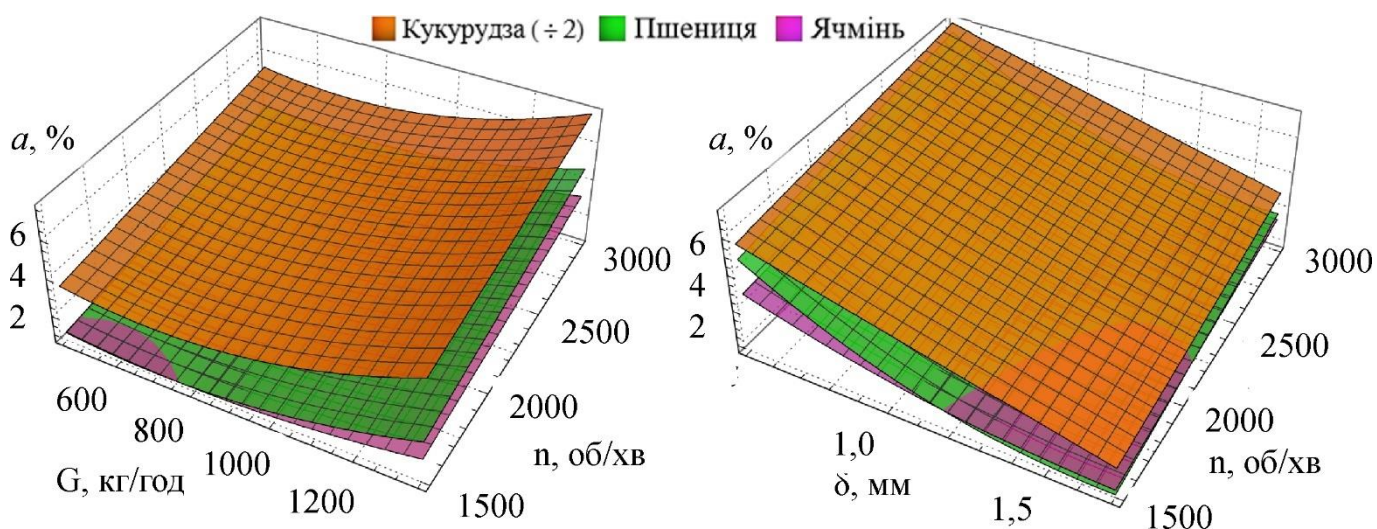


Рисунок 4.8 – Залежність частки пилоподібної фракції в подрібненій масі зерна різних культур a від подачі G , модульного зазору між дисками δ та частоти обертання диска n

Подача зерна в камеру подрібнення має помірний вплив на частку пилоподібної фракції. З фізичної точки зору, цей параметр не змінює суттєво кінетичну енергію взаємодії між частинками та робочими органами, особливо при постійній конструкції подаючого механізму, тому і не призводить до істотного зростання частки пилоподібної фракції.

Зі збільшенням частоти обертання дисків зростає частка пилоподібної фракції. Це пов'язано з тим, що внаслідок збільшення частоти обертання підвищується лінійна швидкість робочих органів, а відповідно – і енергія удару або зсуву, яку вони передають зерну. У режимі високих швидкостей збільшується ймовірність багатократного руйнування однієї й тієї ж частинки, тобто зростає повторне подрібнення вже роздроблених фрагментів. Особливо виразно цей ефект проявляється при подрібненні кукурудзи, структура якої сприяє утворенню надлишкової кількості дрібних часток.

Найбільший вплив на всі три культури мав модульний зазор між дисками. Встановлено чітку закономірність: зі збільшенням зазору частка пилоподібної фракції зменшувалася. Це пояснюється фізикою контакту: вузький зазор створює більшу інтенсивність локального навантаження, що призводить до глибокого руйнування структури зерна, включаючи його внутрішні шари. Навпаки, при ширшому зазорі зернина може проходити з меншою деформацією, що обмежує інтенсивність її руйнування й сприяє зменшенню кількості дрібнодисперсної фракції. Таким чином, зазор між дисками відіграє ключову роль у контролі глибини руйнування і дозволяє регулювати ступінь подрібнення залежно від поставлених технологічних цілей.

Ще одним із важливих показників якості процесу подрібнення є ступінь подрібнення, який відображає рівень зменшення розмірів частинок у результаті дії робочих органів дробарки. З метою кількісної оцінки цього параметра було здійснено статистичну обробку експериментальних даних та побудовано відповідні регресійні моделі, що описують залежність ступеня подрібнення від досліджуваних факторів.

Ступінь подрібнення:

– кукурудзи:

$$\lambda^c = 4,83923 + 0,182497x_7 + 0,376495x_7^2 - 1,25037x_8 - 0,08909x_7x_8 + 0,510381x_8^2 + 0,343071x_9 + 0,037115x_7x_9 - 0,08923x_8x_9 - 0,275523x_9^2; \quad (4.13)$$

– пшениці:

$$\lambda^w = 2,10686 + 0,0466361x_7 + 0,145569x_7^2 - 0,482112x_8 - 0,019309x_7x_8 + 0,280835x_8^2 + 0,175875x_9 + 0,00425475x_7x_9 - 0,0348253x_8x_9 - 0,0757544x_9^2; \quad (4.14)$$

– ячменю:

$$\lambda^b = 2,09983 + 0,0375211x_7 + 0,125095x_7^2 - 0,414027x_8 - 0,026805x_7x_8 + 0,197054x_8^2 + 0,123234x_9 + 0,00833125x_7x_9 - 0,0124963x_8x_9 - 0,071063x_9^2. \quad (4.15)$$

Статистична обробка рівнянь (4.13)–(4.15) приведені в таблиці 4.10.

Отримані моделі адекватні, що підтверджено високими значеннями критерію Фішера ($F_{\text{розн.}} > F_{\text{табл.}}$ для всіх трьох культур). В розкодованому вигляді без урахування незначущих коефіцієнтів за t-критерієм Стюдента рівняння мають наступний вигляд:

– кукурудза:

$$\lambda^c = 7,81781 + 0,000457428n - 5,20295\delta + 1,41773\delta^2; \quad (4.16)$$

– пшениця:

$$\lambda^w = 3,40702 + 0,0002345n - 2,51973\delta + 0,780097\delta^2; \quad (4.17)$$

– ячмінь:

$$\lambda^b = 3,1515 + 0,000164312n - 1,89426\delta + 0,547372\delta^2. \quad (4.18)$$

Таблиця 4.10 – Результати статистичної обробки рівняння (4.13)–(4.15) ступеня подрібнення

Коефі- цієнт	Значен- ня	По- хибка	Коефіцієнт Стьюдента	Рівень значущості	Дисперсійний аналіз	
При подрібненні кукурудзи (4.13)						
k ₀₀	4,83923	0,204	23,6887	2,49656·10 ⁻⁶	Сума квадратів відхилень	
k ₇₀	0,1825	0,125	1,45883	0,204423	Модель	415,8
k ₈₀	-1,2504	0,125	-9,99511	0,000171349	Помилка	0,625981
k ₉₀	0,34307	0,125	2,74242	0,0406749	Оцінка дисперсії	
k ₇₈	-0,0891	0,177	-0,503574	0,635957	Модель	41,58
k ₇₉	0,03712	0,177	0,20979	0,842112	Помилка	0,125196
k ₈₉	-0,0892	0,177	-0,504365	0,63544	Критерій Фішера	
k ₇₇	0,3765	0,184	2,04462	0,0963007		
k ₈₈	0,51038	0,184	2,77171	0,0392857	Розраховане	332,119
k ₉₉	-0,2755	0,184	-1,49627	0,194834	Табличне	2,21
При подрібненні пшениці (4.14)						
k ₀₀	2,10686	0,110	19,0938	7,2637·10 ⁻⁶	Сума квадратів відхилень	
k ₇₀	0,04664	0,068	0,690183	0,520801	Модель	81,449
k ₈₀	-0,4821	0,068	-7,13493	0,000839528	Помилка	0,182632
k ₉₀	0,17588	0,068	2,60283	0,0480844	Оцінка дисперсії	
k ₇₈	-0,0193	0,096	-0,202063	0,847832	Модель	8,1449
k ₇₉	0,00425	0,096	0,0445247	0,96621	Помилка	0,0365264
k ₈₉	-0,0348	0,096	-0,364436	0,730438	Критерій Фішера	
k ₇₇	0,14557	0,099	1,46357	0,203183		
k ₈₈	0,28084	0,099	2,82356	0,0369536	Розраховане	222,987
k ₉₉	-0,0758	0,099	-0,761646	0,480633	Табличне	2,21
При подрібненні ячменю (4.15)						
k ₀₀	2,09983	0,077	27,1889	1,25912·10 ⁻⁶	Сума квадратів відхилень	
k ₇₀	0,03752	0,047	0,793358	0,463537	Модель	76,573
k ₈₀	-0,4140	0,047	-8,75432	0,000322341	Помилка	0,0894691

Коефіцієнт	Значення	Помилка	Коефіцієнт Стюдента	Рівень значущості	Дисперсійний аналіз	
k_{90}	0,12323	0,047	2,60569	0,0479186	Оцінка дисперсії	
k_{78}	-0,0268	0,067	-0,400769	0,705142	Модель	7,6573
k_{79}	0,00833	0,067	0,124563	0,905723	Помилка	0,0178938
k_{89}	-0,0125	0,067	-0,186835	0,859134	Критерій Фішера	
k_{77}	0,1251	0,07	1,79695	0,132276		
k_{88}	0,19705	0,07	2,83063	0,0366476	Розраховане	427,93
k_{99}	-0,0711	0,07	-1,0208	0,354173	Табличне	2,21

Графічна інтерпретація залежностей (4.16)–(4.18) представлена на рис. 4.9 (значення для кукурудзи зменшені в два рази для кращої візуалізації отриманих залежностей).

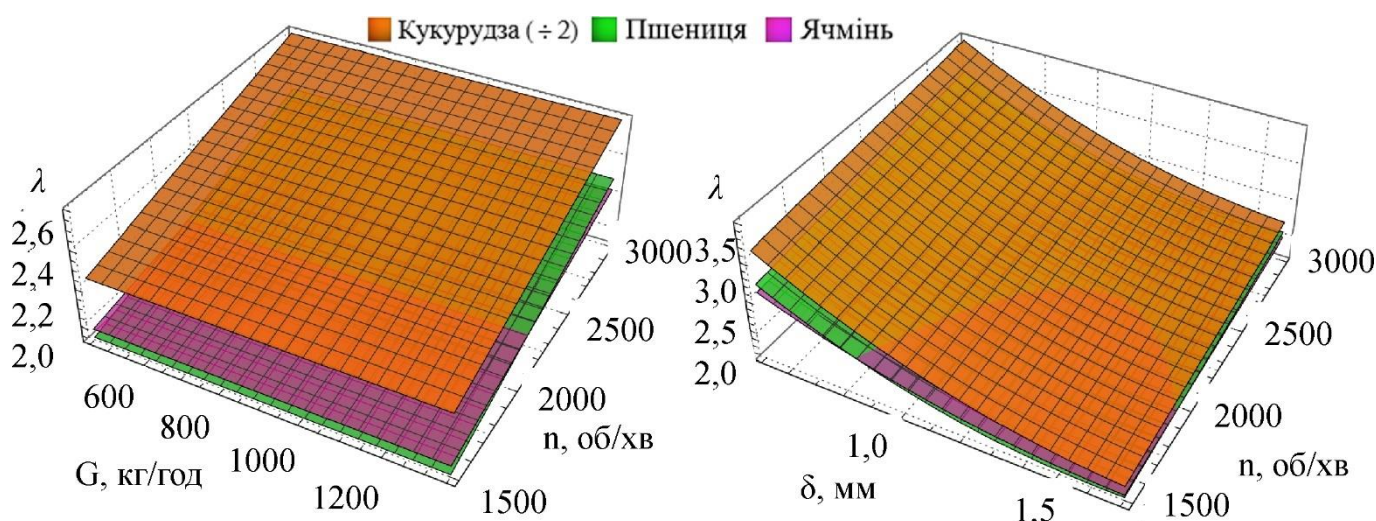


Рисунок 4.9 – Залежність ступеня подрібнення зерна різних культур λ від подачі G , модульного зазору між дисками δ та частоти обертання диска n

З отриманих графіків можна зробити висновок, що найбільша ступінь подрібнення спостерігалася при обробці зерна кукурудзи. Це пояснюється фізико-механічними властивостями цієї культури: кукурудза має відносно більший еквівалентний діаметр, менш щільну структуру ендосперму та нижчу межу міцності на розтяг і зсув, що сприяє легшому руйнуванню зернин під дією ударних і зсувних навантажень.

Серед досліджуваних факторів найменший вплив на ступінь подрібнення має подача зерна в камеру подрібнення – її варіювання практично не змінювало характер контакту зерна з робочими органами. З фізичної точки зору, при сталому режимі роботи й неперевищенні граничної щільності завантаження, подача не спричиняє значних змін у траєкторії руху зерна чи його взаємодії з подрібнювальними елементами.

Частота обертання робочого органу проявила помірний вплив. Зі зростанням частоти обертання ступінь подрібнення поступово підвищувалася. Це пов'язано зі збільшенням кінетичної енергії, що передається зерну при контакті з дисками. Вищі швидкості сприяють інтенсивнішому впливу з боку сил інерції, що підвищує ймовірність виникнення крихких руйнувань та багатократного дроблення частинок. Особливо виражений цей ефект у випадку кукурудзи, структура якої дозволяє реалізувати подібні механізми руйнування навіть при помірних навантаженнях.

Найбільш суттєвий вплив виявив модульний зазор між дисками. Зі зменшенням зазору між робочими дисками ступінь подрібнення зростала. Це пояснюється тим, що зменшення простору між дисками призводить до зростання локального тиску і концентрації напружень у зернах, що інтенсифікує процеси стиску, зсуву та розриву. У вузькому зазорі зернина зазнає більш потужного контактного впливу з боку обох дисків, що сприяє глибокому руйнуванню, а також підвищує ймовірність повторного дроблення частково подрібнених фрагментів. Така тенденція спостерігалася для всіх трьох досліджуваних культур, однак найбільш виражено – для кукурудзи, зважаючи на її структурну схильність до крихкого руйнування.

Таким чином, з фізичної точки зору, ступінь подрібнення визначається комбінацією кінетичної енергії робочих органів і геометричних обмежень у зоні подрібнення, які спільно формують інтенсивність і характер дії на зернову сировину.

На основі отриманих моделей, що представлені у цьому розділі, у середовищі Wolfram Cloud було проведено чисельну оптимізацію (3.8) з метою знаходження таких поєднань факторів, за яких питома енергоємність та частка пилоподібної фракції в подрібненій масі є мінімальними, а ступінь подрібнення в заданих межах. Результати розрахунку наведені в таблиці 4.11.

Таблиця 4.11 – Раціональні параметри процесу подрібнення з використанням базового робочого органу

Культура	Кукурудза	Пшениця	Ячмінь
Подача зерна в камеру подрібнення G , кг/год	903	923	1057
Модульний зазор між дисками δ , мм	0,71	0,72	0,73
Частота обертання диска n , об/хв	1642	1500	1500
Енергоємність процесу подрібнення q , кВт·год/т	4,81	3,85	7,07
Частка пилоподібної фракції в подрібненій масі a , %	9,98	3,07	2,11
Ступінь подрібнення λ	7,57	3,35	3,30

Згідно таблиці 4.11 найвища подача спостерігається при подрібненні ячменя (1057 кг/год), а найменша – при подрібненні кукурудзи (903 кг/год). Значення модульного зазору δ для всіх культур варіюється в межах 0,71–0,73 мм, що свідчить про необхідність точного налаштування міждискового простору залежно від властивостей сировини. Частота обертання диска у випадку кукурудзи є вищою (1642 об/хв) порівняно з пшеницею та ячменем (по 1500 об/хв).

Щодо енергоємності процесу, найменше значення спостерігається для пшениці (3,85 кВт·год/т), тоді як для ячменю воно є максимальним (7,07 кВт·год/т), що свідчить про відмінності у фізико-механічних властивостях зерна. Частка пилоподібної фракції є найбільшою при подрібненні кукурудзи (9,98%), і значно меншою для пшениці (3,07%) та ячменю (2,11%). Ступінь подрібнення також найвищий у кукурудзи ($\lambda = 7,57$), що може бути наслідком як високої частоти обертання, так і характеристик самої культури.

4.3 Результати експериментальних досліджень удосконаленого дискового подрібнювача

У результаті проведених експериментальних досліджень були визначені основні показники ефективності та якості процесу подрібнення зерна кукурудзи, пшениці та ячменю.

Узагальнені результати експериментальних досліджень, що стосуються продуктивності подрібнення, питомої енергоємності, фракційного складу та ступеня

подрібнення, представлені в таблицях додатку Е. Це дозволяє здійснити порівняльну оцінку ефективності роботи модернізованого дискового подрібнювача залежно від типу зернової сировини. Результати розрахунку критерію Кохрена наведено в таблиці 4.12.

Таблиця 4.12 – Значення розрахованого критерію Кохрена для результатів дослідження удосконаленого дискового подрібнювача

Продуктивність Q, кг/год	Потужність P, Вт	Частка пилоподібної фракції a, %	Модуль подрібнення M, мм
Табличне значення критерію Кохрена ($G_{\text{табл}} = 0,3346$)			
Подрібнення кукурудзи			
0,237	0,324	0,178	0,349
Подрібнення пшениці			
0,182	0,148	0,086	0,202
Подрібнення ячменю			
0,174	0,317	0,091	0,298

Оскільки в усіх досліджуваних випадках максимальне значення цього критерію не перевищує табличне ($G_{\text{max}} < G_{\text{табл}} = 0,3346$), можна зробити висновок про однорідність дисперсій експериментальних даних за всіма показниками та культурами. Це свідчить про статистичну стабільність результатів і дає підстави для проведення подальшої обробки, зокрема розрахунку коефіцієнтів регресійного рівняння та перевірки їх значущості.

У результаті статистичної обробки експериментальних даних, отриманих при дослідженні роботи розробленого робочого органу дискового подрібнювача, було побудовано математичні моделі, що описують зміну питомої енергоємності подрібнення зерна кукурудзи, пшениці та ячменю. Основними варійованими факторами в експерименті були кут встановлення ударних накладок α , їх кількість на одному диску z , а також частота обертання робочого органу n .

Первинні експериментальні дані (додаток Е) були оброблені за допомогою хмарного обчислювального середовища Wolfram Cloud. Отримані рівняння в

закодованому вигляді які описали вплив факторів на питому енергоємність подрібнення для кожної культури.

Питома енергоємність:

– кукурудзи:

$$q^c = 4,19413 - 0,157199x_9 - 0,109278x_9^2 + 0,349674x_{11} + 0,0441439x_9x_{11} + 0,114221x_{11}^2 + 0,250973x_{10} + 0,120815x_9x_{10} - 0,00451976x_{11}x_{10} + 0,343801x_{10}^2; \quad (4.19)$$

– пшениці:

$$q^w = 3,68123 - 0,228551x_9 + 0,0105792x_9^2 + 0,333196x_{11} + 0,0112542x_9x_{11} + 0,00100009x_{11}^2 + 0,416216x_{10} + 0,0826383x_9x_{10} + 0,0054625x_{11}x_{10} + 0,251271x_{10}^2; \quad (4.20)$$

– ячменю:

$$q^b = 6,59258 - 0,321588x_9 - 0,112323x_9^2 + 0,483949x_{11} - 0,0331834x_9x_{11} - 0,250749x_{11}^2 + 0,367823x_{10} + 0,0555622x_9x_{10} - 0,00579827x_{11}x_{10} + 0,500406x_{10}^2. \quad (4.21)$$

Статистична обробка рівнянь (4.19)–(4.21) приведена в таблиці 4.13.

Таблиця 4.13 – Результати статистичної обробки рівняння (4.19)–(4.21) питомої енергоємності

Коефі- цієнт	Значен- ня	По- хибка	Коефіцієнт Стюдента	Рівень значущості	Дисперсійний аналіз	
При подрібненні кукурудзи (4.19)						
k ₀₀	4,19413	0,06	64,3676	1,71334·10 ⁻⁸	Сума квадратів відхилень	
k ₉₀	-0,1571	0,03	-3,93966	0,0109636	Модель	290,069
k ₁₁₀	0,34967	0,03	8,76342	0,000320759	Помилка	0,0636853
k ₁₀₀	0,25097	0,03	6,2898	0,00149331	Оцінка дисперсії	
k ₉₁₁	0,04414	0,05	0,782287	0,469454	Модель	29,0069
k ₉₁₀	0,12081	0,05	2,141	0,0852098	Помилка	0,0127371
k ₁₁₁₀	-0,0045	0,05	-0,080096	0,939268	Критерій Фішера	
k ₉₉	-0,1092	0,05	-1,86058	0,12188		
k ₁₁₁₁	0,11422	0,05	1,94473	0,109406	Розраховане	2277,355
k ₁₀₁₀	0,34380	0,05	5,85357	0,00206139	Табличне	2,21
При подрібненні пшениці (4.20)						
k ₀₀	3,68123	0,07	52,3108	4,82667·10 ⁻⁸	Сума квадратів відхилень	
k ₉₀	-0,2285	0,04	-5,30354	0,0031828	Модель	222,003
k ₁₁₀	0,33319	0,04	7,73183	0,000578156	Помилка	0,074284
k ₁₀₀	0,41621	0,04	9,65831	0,000201914	Оцінка дисперсії	

Коефі- цієнт	Значен- ня	По- хибка	Коефіцієнт Стюдента	Рівень значущості	Дисперсійний аналіз	
k_{911}	0,01125	0,06	0,184664	0,860749	Модель	22,2003
k_{910}	0,08263	0,06	1,35597	0,233132	Помилка	0,0148568
k_{1110}	0,00546	0,06	0,0896311	0,93206	Критерій Фішера	
k_{99}	0,01057	0,06	0,166779	0,874079		
k_{1111}	0,00100	0,06	0,0157662	0,988031	Розраховане	1494,285
k_{1010}	0,25127	0,06	3,96121	0,0107298	Табличне	2,21
При подрібненні ячменю (4.21)						
k_{00}	6,59258	0,09	70,7644	$1,06733 \cdot 10^{-8}$	Сума квадратів відхилень	
k_{90}	-0,3215	0,05	-5,63695	0,00243649	Модель	671,597
k_{110}	0,48394	0,05	8,48288	0,000374113	Помилка	0,130188
k_{100}	0,36782	0,05	6,44737	0,00133505	Оцінка дисперсії	
k_{911}	-0,0331	0,08	-0,411291	0,697894	Модель	67,1597
k_{910}	0,05556	0,08	0,688665	0,521678	Помилка	0,0260377
k_{1110}	-0,0057	0,08	-0,0718667	0,945494	Критерій Фішера	
k_{99}	-0,1123	0,08	-1,33757	0,238652		
k_{1111}	-0,2507	0,08	-2,98598	0,0305885	Розраховане	2579,325
k_{1010}	0,50040	0,08	5,95896	0,00190368	Табличне	2,21

Адекватність моделей підтверджена високими значеннями критерію Фішера ($F_{\text{розрах.}} > F_{\text{табл.}}$ для всіх трьох культур).

Підставляючи в рівняння (4.19)–(4.21) без урахування незначущих коефіцієнтів за t-критерієм Стюдента замість x_i вирази для факторів досліджень в явному вигляді отримуємо залежність питомої енергоємності від факторів досліджень в розкодованому вигляді:

– кукурудза:

$$q^c = 7,395 - 0,000692859n - 0,724759z + 0,0000536956nz + 0,0382001z^2 + 0,0349674\beta; \quad (4.22)$$

– пшениця:

$$q^w = 4,71328 - 0,000304735n - 0,363803z + 0,027919z^2 + 0,0333196\beta; \quad (4.23)$$

– ячмінь:

$$q^b = 8,98664 - 0,000428784n - 0,878204z + 0,0556007z^2 + 0,148695\beta - 0,00250749\beta^2. \quad (4.24)$$

Графічна інтерпретація залежностей (4.22)–(4.24) представлена на рис. 4.10 (значення для ячменя зменшені в 2 рази для кращої візуалізації отриманих залежностей).

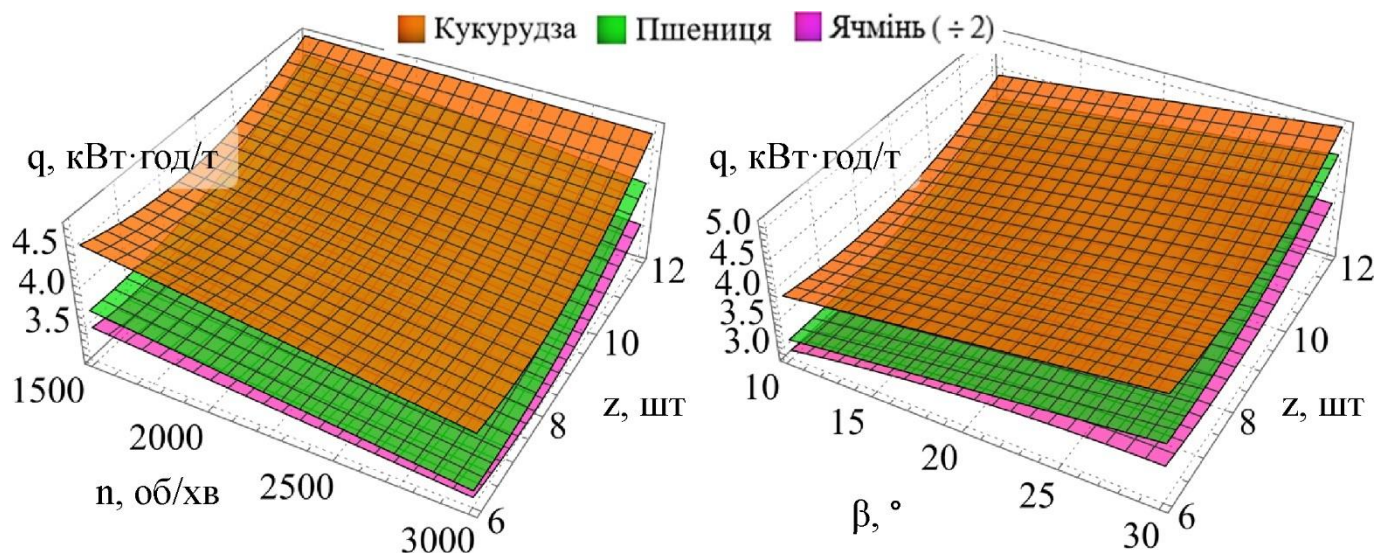


Рисунок 4.10 – Залежність питомої енергоємності подрібнення зерна q від кута встановлення ударних накладок β , кількості ударних накладок на одному диску z , частоти обертання робочого органу n

На основі побудованих графічних залежностей встановлено, що найбільше значення питомої енергоємності подрібнення характерне для зерна ячменю. Це пов'язано з його фізико-механічними властивостями – зокрема, з відносно вищою щільністю і більш еластичною структурою оболонки, яка ускладнює ініціацію тріщини під дією ударного навантаження. Внаслідок цього ячмінь потребує більшої кількості енергії для досягнення аналогічного ступеня руйнування порівняно з іншими культурами.

Згідно з отриманими графіками, вплив кількості ударних накладок на питому енергоємність має параболічний характер. При кількості 8–9 накладок спостерігається мінімум питомої енергоємності. Такий результат пояснюється оптимальним балансом між кількістю контактів зерна з робочими елементами та інтенсивністю енергетичного навантаження на кожен контакт. За меншої кількості

накладок знижується ефективність подрібнення через зменшення ймовірності зіткнення зерна з активними зонами, а при надмірній кількості – зростає гідродинамічний опір повітряного та зернового потоку, а також відбувається зростання втрат на тертя і взаємодію частинок між собою, що призводить до підвищення енерговитрат.

Зі збільшенням кута встановлення ударних накладок також фіксувалося зростання питомої енергоємності. З фізичної точки зору це можна пояснити зміною напрямку дії сили удару від переважно нормальної до більш тангенціальної, що зменшує ефективність передачі енергії для ініціації руйнування. Крім того, збільшення кута може спричинити зростання ефекту ковзання зерна по поверхні накладки замість ефективного удару, що підвищує втрати енергії на тертя.

Частота обертання мала найменший вплив порівняно з іншими дослідженими факторами. Хоча зі зростанням частоти обертання підвищується лінійна швидкість робочих органів, відповідне зростання питомої потужності не є пропорційним зростанню продуктивності, яка збільшується швидше. Як результат, питома енергоємність зменшується. Це пов'язано з тим, що при високих обертах час перебування зерна в зоні подрібнення скорочується, однак кількість обробленої сировини за одиницю часу значно зростає, що позитивно позначається на показнику питомих витрат енергії.

Таким чином, оптимізація конструкційних параметрів – таких як кількість і кут нахилу ударних накладок – дозволяє суттєво знизити енергетичні витрати при збереженні високої ефективності подрібнення, а врахування фізичних механізмів передачі енергії забезпечує обґрунтований підхід до модернізації подрібнювального обладнання.

Такий самий підхід обробки експериментальних даних дослідження розробленого робочого органу було застосовано для побудови регресійних моделей, які описують залежність частки пилоподібної фракції (часток діаметром до 0,2 мм), утвореної в результаті подрібнення зерна кукурудзи, пшениці та ячменю, від варіюваних технологічних факторів.

Частка пилоподібної фракції:

– кукурудзи:

$$a^c = 5,67333 + 0,7575x_9 - 0,0166667x_9^2 + 0,31125x_{11} - 0,0075x_9x_{11} + 0,500833x_{11}^2 + 0,13875x_{10} + 0,0125x_9x_{10} + 0,05x_{11}x_{10} + 0,535833x_{10}^2; \quad (4.25)$$

– пшениці:

$$a^w = 1,96667 + 0,25x_9 + 0,0166667x_9^2 + 0,075x_{11} - 0,035x_9x_{11} + 0,161667x_{11}^2 + 0,0575x_{10} + 0,005x_9x_{10} + 0,005x_{11}x_{10} + 0,146667x_{10}^2; \quad (4.26)$$

– ячменю:

$$a^b = 1,56667 + 0,21125x_9 + 0,0116667x_9^2 + 0,08125x_{11} - 0,01x_9x_{11} + 0,146667x_{11}^2 + 0,0525x_{10} - 0,0025x_9x_{10} + 0,0175x_{11}x_{10} + 0,134167x_{10}^2. \quad (4.27)$$

Статистична обробка рівнянь (4.25)–(4.27) приведена в таблиці 4.14.

Отримані моделі адекватні, що підтверджено високими значеннями критерію Фішера ($F_{\text{розн.}} \text{ перевищує } F_{\text{табл.}}$ для всіх трьох культур). В розкодованому вигляді без урахування незначущих коефіцієнтів за t -критерієм Стюдента рівняння мають наступний вигляд:

– кукурудза:

$$a^c = 9,18791 + 0,00101n - 1,02542z + 0,059537z^2 - 0,169208\beta + 0,00500833\beta^2; \quad (4.28)$$

– пшениця:

$$a^w = 2,86084 + 0,000333333n - 0,274167z + 0,0162963z^2 - 0,0571668\beta + 0,00161667\beta^2; \quad (4.29)$$

– ячмінь:

$$a^b = 2,40709 + 0,000281667n - 0,250834z + 0,0149074z^2 - 0,0505418\beta + 0,00146667\beta^2. \quad (4.30)$$

Графічна інтерпретація залежностей (4.28)–(4.30) представлена на рис. 4.11 (значення для кукурудзи зменшені в два рази для кращої візуалізації отриманих залежностей).

З аналізу побудованих графіків встановлено, що найбільша кількість пилоподібної фракції (часток діаметром менше 0,2 мм) утворюється при подрібненні кукурудзи. Це зумовлено її крихкою структурою, порівняно меншою механічною

міцністю ендосперму та більшими початковими розмірами зернин, що сприяє виникненню тріщини та розпаду на дрібні фрагменти навіть при помірному механічному впливі.

Таблиця 4.14 – Результати статистичної обробки рівняння (4.25)–(4.27) частки пилоподібної фракції при подрібненні

Коефі- цієнт	Значен- ня	По- хибка	Коефіцієнт Стьюдента	Рівень значущості	Дисперсійний аналіз	
При подрібненні кукурудзи (4.25)						
k ₀₀	5,67333	0,056	100,405	1,85812·10 ⁻⁹	Сума квадратів відхилень	
k ₉₀	0,7575	0,034	21,8919	3,69173·10 ⁻⁶	Модель	587,234
k ₁₁₀	0,31125	0,034	8,99517	0,000283402	Помилка	0,0478917
k ₁₀₀	0,13875	0,034	4,0099	0,0102226	Оцінка дисперсії	
k ₉₁₁	-0,0075	0,048	-0,153266	0,884182	Модель	58,7234
k ₉₁₀	0,0125	0,048	0,255444	0,808556	Помилка	0,00957833
k ₁₁₁₀	0,05	0,048	1,02177	0,353755	Критерій Фішера	
k ₉₉	-0,0166	0,050	-0,32723	0,75675		
k ₁₁₁₁	0,50083	0,050	9,83325	0,000185293	Розраховане	6130,856
k ₁₀₁₀	0,53583	0,050	10,5204	0,000133964	Табличне	2,21
При подрібненні пшениці (4.26)						
k ₀₀	1,96667	0,021	92,9393	2,73381·10 ⁻⁹	Сума квадратів відхилень	
k ₉₀	0,25	0,012	19,2927	6,90109·10 ⁻⁶	Модель	69,4341
k ₁₁₀	0,075	0,012	5,78781	0,00216759	Помилка	0,00671667
k ₁₀₀	0,0575	0,012	4,43732	0,00678173	Оцінка дисперсії	
k ₉₁₁	-0,035	0,018	-1,90988	0,114404	Модель	6,94341
k ₉₁₀	0,005	0,018	0,27284	0,795886	Помилка	0,00134333
k ₁₁₁₀	0,005	0,018	0,27284	0,795886	Критерій Фішера	
k ₉₉	0,01666	0,019	0,873787	0,42221		
k ₁₁₁₁	0,16166	0,019	8,47574	0,000375605	Розраховане	5168,804
k ₁₀₁₀	0,14666	0,019	7,68933	0,00059322	Табличне	2,21
При подрібненні ячменю (4.27)						
k ₀₀	1,56667	0,013	119,188	7,8852·10 ⁻¹⁰	Сума квадратів відхилень	
k ₉₀	0,21125	0,008	26,2444	1,50102·10 ⁻⁶	Модель	45,083
k ₁₁₀	0,08125	0,008	10,094	0,000163443	Помилка	0,00259167
k ₁₀₀	0,0525	0,008	6,52228	0,00126679	Оцінка дисперсії	
k ₉₁₁	-0,01	0,011	-0,878467	0,419895	Модель	4,5083
k ₉₁₀	-0,0025	0,011	-0,219617	0,834854	Помилка	0,000518333
k ₁₁₁₀	0,0175	0,011	1,53732	0,184823	Критерій Фішера	
k ₉₉	0,01166	0,011	0,984671	0,370004		

Коефіцієнт	Значення	Помилка	Коефіцієнт Стьюдента	Рівень значущості	Дисперсійний аналіз	
k_{1111}	0,14666	0,011	12,3787	$6,0957 \cdot 10^{-05}$	Розраховане	8697,69
k_{1010}	0,13416	0,011	11,3237	$9,3915 \cdot 10^{-05}$	Табличне	2,21

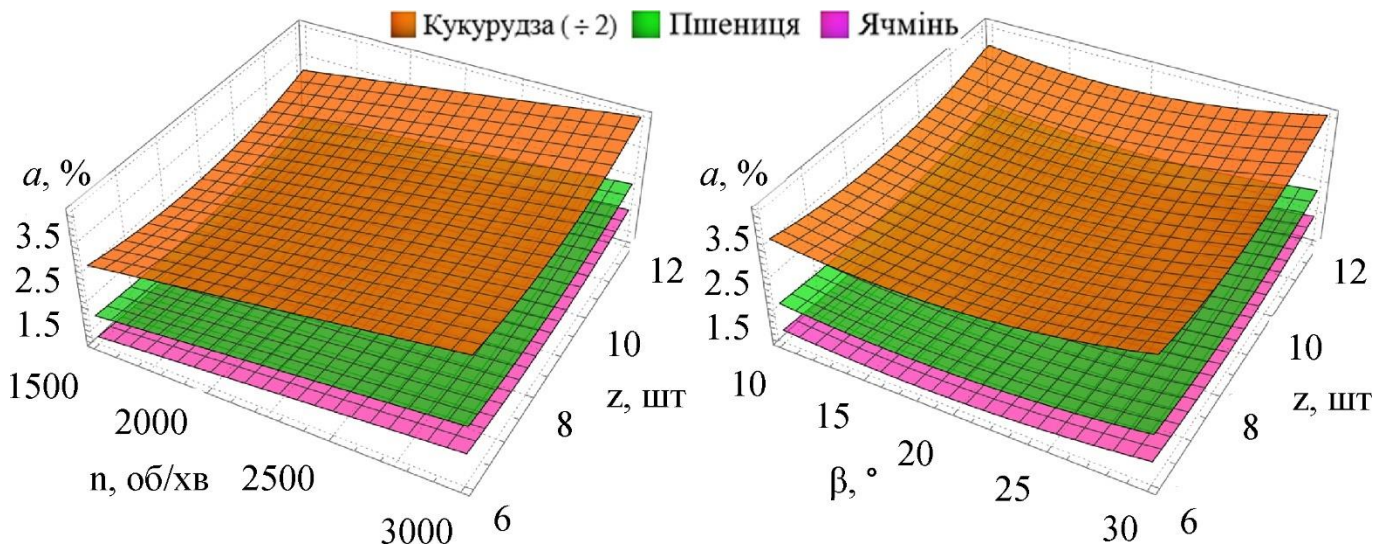


Рисунок 4.11 – Залежність частки пилоподібної фракції в подрібненій масі зерна різних культур a від кута встановлення ударних накладок β , кількості ударних накладок на одному диску z , частоти обертання робочого органу n

Частота обертання робочого органу чинить прямий вплив на утворення дрібнодисперсної фракції. Зі збільшенням частоти обертання зростає лінійна швидкість ударних елементів, що веде до збільшення кінетичної енергії зіткнення. При досягненні певного порогу енергії удару відбувається не лише первинне руйнування зерна, а й інтенсивне вторинне подрібнення вже фрагментованих часток. Це суттєво підвищує кількість часток, діаметр яких менше 0,2 мм, тобто пилоподібної фракції. Високі швидкості також сприяють розвитку турбулентних потоків у камері подрібнення, які можуть спричинити додаткове стирання та взаємодію частинок між собою.

Вплив кількості ударних накладок виявляє параболічний характер, аналогічний до впливу на питому енергоємність. При кількості 8–9 накладок утворюється найменша частка пилоподібної фракції. У цьому випадку забезпечується достатня

кількість контактів для ефективного подрібнення без надмірної деструкції зерна. При меншій кількості накладок знижується ймовірність руйнування, однак частина зернин може зазнавати багаторазових неефективних зіткнень, що призводить до тертя і стирання. При надмірній кількості накладок зростає інтенсивність механічного впливу, включно з багаторазовими ударами по вже подрібнених частках, що призводить до їх надмірного руйнування та зростання пилоподібної фракції.

Аналогічну залежність спостерігаємо для кута встановлення ударних накладок. Мінімальна кількість пилоподібної фракції фіксується при кутах нахилу 16–18°. Це пояснюється тим, що при цьому діапазоні кутів забезпечується оптимальний вектор ударної сили, який спрямований на ефективне руйнування зерна без надлишкового стирання. При менших кутах енергія удару може бути недостатньою для розлому зерна, а при більших кутах зростає тангенціальна складова сили, яка збільшує тертя і зумовлює підвищення частки пилоподібного матеріалу через стирання.

Таким чином, кількість пилоподібної фракції визначається не лише механічними властивостями зерна, а й енергетичними та кінематичними характеристиками взаємодії робочих елементів з матеріалом. Оптимізація конструктивних параметрів ударних елементів дозволяє контролювати фракційний склад подрібненої маси й уникати надмірного утворення найдрібніших часток, що є небажаними з погляду енергетичних витрат і якості кінцевого продукту.

Далі представлено результати статистичної обробки експериментальних даних щодо ступеня подрібнення зерна при використанні розробленого робочого органу. Аналіз проводився з урахуванням трьох основних факторів варіювання.

Ступінь подрібнення:

– кукурудзи:

$$\lambda^c = 6,02862 + 0,851036x_9 + 0,221999x_9^2 + 0,27455x_{11} + 0,063274x_9x_{11} + 0,150458x_{11}^2 + 0,0861363x_{10} + 0,178612x_9x_{10} + 0,0487321x_{11}x_{10} + 0,165189x_{10}^2; \quad (4.31)$$

– пшениці:

$$\lambda^w = 3,25066 + 0,423271x_9 + 0,087807x_9^2 + 0,154137x_{11} + 0,0246032x_9x_{11} + 0,083627x_{11}^2 + 0,0395829x_{10} + 0,0743857x_9x_{10} + 0,034085x_{11}x_{10} + 0,0890324x_{10}^2; \quad (4.32)$$

– ячменю:

$$\lambda^b = 3,34286 + 0,438869x_9 + 0,0903304x_9^2 + 0,167435x_{11} + 0,0342195x_9x_{11} + 0,104681x_{11}^2 + 0,0321671x_{10} + 0,0817579x_9x_{10} + 0,0408415x_{11}x_{10} + 0,0866249x_{10}^2. \quad (4.33)$$

Статистична обробка рівнянь (4.31)–(4.33) приведена в таблиці 4.15.

Таблиця 4.15 – Результати статистичної обробки рівняння (4.31)–(4.33) ступеня подрібнення

Коефі- цієнт	Значен- ня	По- хибка	Коефіцієнт Стюдента	Рівень значущості	Дисперсійний аналіз	
При подрібненні кукурудзи (4.31)						
k ₀₀	6,02862	0,076	78,6793	6,28421·10 ⁻⁹	Сума квадратів відхилень	
k ₉₀	0,85103	0,046	18,1374	9,36249·10 ⁻⁶	Модель	605,188
k ₁₁₀	0,27455	0,046	5,85124	0,00206506	Помилка	0,0880658
k ₁₀₀	0,08613	0,046	1,83575	0,125834	Оцінка дисперсії	
k ₉₁₁	0,06327	0,066	0,953535	0,384109	Модель	60,5188
k ₉₁₀	0,17861	0,066	2,69167	0,0432122	Помилка	0,0176132
k ₁₁₁₀	0,04873	0,066	0,73439	0,495686	Критерій Фішера	
k ₉₉	0,22199	0,069	3,21427	0,023616		
k ₁₁₁₁	0,15045	0,069	2,17843	0,0812733	Розраховане	3435,991
k ₁₀₁₀	0,16518	0,069	2,39173	0,0622545	Табличне	2,21
При подрібненні пшениці (4.32)						
k ₀₀	3,25066	0,050	64,1552	1,74187·10 ⁻⁸	Сума квадратів відхилень	
k ₉₀	0,42327	0,031	13,6415	0,000037958	Модель	174,076
k ₁₁₀	0,15413	0,031	4,96765	0,00422028	Помилка	0,0385098
k ₁₀₀	0,03958	0,031	1,27571	0,258109	Оцінка дисперсії	
k ₉₁₁	0,02460	0,043	0,560689	0,599204	Модель	17,4076
k ₉₁₀	0,07438	0,043	1,69519	0,150809	Помилка	0,00770195
k ₁₁₁₀	0,03408	0,043	0,776771	0,472423	Критерій Фішера	
k ₉₉	0,08780	0,045	1,92255	0,11256		
k ₁₁₁₁	0,08362	0,045	1,83103	0,1266	Розраховане	2260,155
k ₁₀₁₀	0,08903	0,045	1,94938	0,108756	Табличне	2,21
При подрібненні ячменю (4.33)						
k ₀₀	3,34286	0,049	68,0263	1,29991·10 ⁻⁸	Сума квадратів відхилень	
k ₉₀	0,43886	0,030	14,5841	0,000027370	Модель	184,919
k ₁₁₀	0,16743	0,030	5,56402	0,00258044	Помилка	0,036222
k ₁₀₀	0,03216	0,030	1,06894	0,333962	Оцінка дисперсії	
k ₉₁₁	0,03421	0,042	0,804086	0,457856	Модель	18,4919
k ₉₁₀	0,08175	0,042	1,92114	0,112764	Помилка	0,00724441
k ₁₁₁₀	0,04084	0,042	0,959689	0,381287	Критерій Фішера	
k ₉₉	0,09033	0,044	2,0393	0,096955		

Коефіцієнт	Значення	Помилка	Коефіцієнт Стьюдента	Рівень значущості	Дисперсійний аналіз	
k ₁₁₁₁	0,10468	0,044	2,36329	0,0644876	Розраховане	2552,57
k ₁₀₁₀	0,08662	0,044	1,95565	0,107887	Табличне	2,21

Значущість побудованих регресійних моделей підтверджується високими значеннями розрахованого критерію Фішера $F_{\text{розрах.}}$, які значно перевищують табличні значення $F_{\text{табл.}}$ для кожної з культур – кукурудзи, пшениці та ячменю. Це свідчить про адекватність моделей експериментальним даним і підтверджує їх придатність для опису процесу подрібнення.

Після виключення з рівнянь регресії незначущих коефіцієнтів (визначених за t-критерієм Стьюдента), і підстановки виразів для досліджуваних факторів у розкорованому вигляді, отримано математичні моделі, що описують залежність ступеня подрібнення від факторів:

– кукурудза:

$$\lambda^c = 8,62044 - 0,00135573n + 3,94665 \cdot 10^{-7} n^2 - 0,50899z + 0,0000793831nz + 0,0183543z^2 - 0,0327282\beta + 0,00150458\beta^2; \quad (4.34)$$

– пшениця:

$$\lambda^w = 1,67257 + 0,000564361n + 0,0154137\beta; \quad (4.35)$$

– ячмінь:

$$\lambda^b = 2,11011 + 0,000585159n - 0,0251289\beta + 0,00104681\beta^2. \quad (4.36)$$

Графічна інтерпретація залежностей (4.34)–(4.36) представлена на рис. 4.12 (значення для кукурудзи зменшені в 2 рази для кращої візуалізації отриманих залежностей).

Як видно з отриманих графіків, найбільший ступінь подрібнення спостерігався під час подрібнення зерна кукурудзи. Це пов'язано з більшим еквівалентним діаметром її зернин порівняно з пшеницею та ячменем, а також з меншою механічною міцністю крохмального ендосперму, що робить її більш сприйнятливою до руйнування під дією механічного навантаження. Великі зерна кукурудзи при ударі мають більшу площу контакту, що сприяє ефективнішому передаванню енергії й, відповідно, більш глибокому руйнуванню структури.

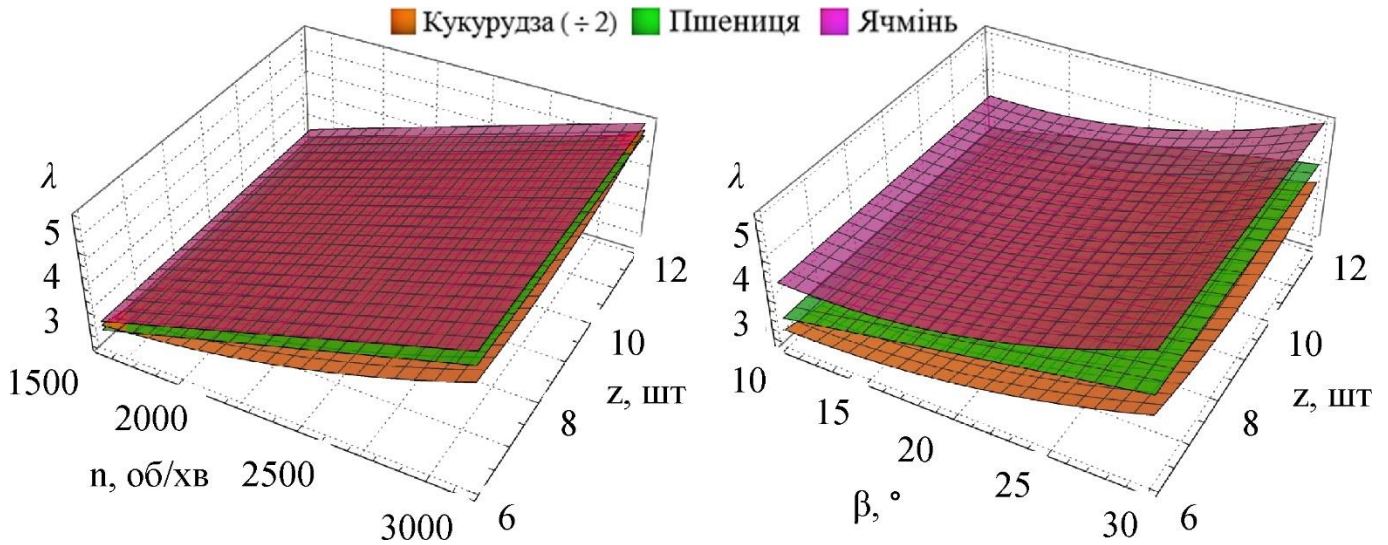


Рисунок 4.12 – Залежність ступеня подрібнення λ від кута встановлення ударних накладок β , кількості ударних накладок на одному диску z , частоти обертання робочого органу n

Зі збільшенням кута встановлення ударних накладок спостерігається підвищення ступеня подрібнення для всіх культур. Це пояснюється тим, що більші кути нахилу змінюють напрямок дії сили удару, збільшуючи радіальну складову, яка ефективніше руйнує зернину через розтяг і зріз, а не лише стискання. Таким чином, збільшується інтенсивність деформації та ймовірність розлому зерна на дрібніші фрагменти.

Кількість ударних накладок суттєво впливала на ступінь подрібнення лише при подрібненні кукурудзи. Найменше значення ступеня подрібнення спостерігалось при кількості накладок у межах 8–10 шт., що свідчить про наявність оптимального режиму взаємодії між робочими елементами та матеріалом. За меншої кількості накладок знижується частота ударів і зона активного руйнування, а за надмірної кількості зростає кількість повторних зіткнень із частками, що вже подрібнені, що призводить до надмірного розмелювання і стирання, тобто збільшує енерговитрати без суттєвого підвищення ефективності процесу.

Зі збільшенням частоти обертання також зростає ступінь подрібнення. Це зумовлено збільшенням лінійної швидкості ударних елементів, що підвищує

кінетичну енергію удару. За умов високої швидкості зіткнення зернини зазнають більш інтенсивного руйнування завдяки значнішому рівню напруг, які виникають у момент контакту. Крім того, при підвищеній частоті збільшується кількість контактів між зерном і робочими органами за одиницю часу, що посилює процес диспергування та підвищує ступінь подрібнення.

Таким чином, ступінь подрібнення є результатом комплексної взаємодії фізико-механічних властивостей зерна та кінематичних і конструктивних параметрів подрібнювача. Раціональний підбір кількості та кута встановлення ударних елементів, а також частоти обертання, дозволяє забезпечити ефективне подрібнення з урахуванням енергетичних витрат і цільового фракційного складу продукту.

Спираючись на побудовані моделі, подані в цьому розділі, у середовищі Wolfram Cloud було здійснено чисельну оптимізацію (3.8) з метою визначення таких комбінацій факторів, за яких досягається мінімальне значення питомої енергоємності q та частки пилоподібної фракції у продукті подрібнення a при визначеному діапазоні ступеня подрібнення λ . Підсумкові результати оптимізації подано в таблиці 4.16.

Таблиця 4.16 – Раціональні параметри процесу подрібнення з використанням розробленого робочого органу

Культура	Кукурудза	Пшениця	Ячмінь
Частота обертання диска n , об/хв	1764	1500	1500
Кут встановлення ударних накладок β , °	15,9	17,7	17,2
Кількість ударних накладок z , шт.	9	9	9
Енергоємність процесу подрібнення q , кВт·год/т	4,15	3,63	6,76
Частка пилоподібної фракції в подрібненій масі a , %	5,13	1,71	1,34
Ступінь подрібнення λ	7,22	3,55	3,66

Аналіз отриманих даних свідчить про досягнення збалансованого поєднання технологічної ефективності та енергетичної доцільності в роботі подрібнювача при обробці трьох основних видів зерна: кукурудзи, пшениці та ячменю.

Частота обертання диска становить 1764 об/хв для кукурудзи, тоді як для пшениці та ячменю вона нижча – 1500 об/хв, що обґрунтовується більшою твердістю і масивністю зерна

кукурудзи, яке потребує інтенсивнішого впливу. Кут встановлення ударних накладок β , який визначає траєкторію удару та глибину проникнення у зерно, коливається в межах 15,9–17,7°. Найменший кут застосовано для кукурудзи (15,9°), що дозволяє сконцентрувати ударну дію на міцнішій структурі, тоді як для пшениці та ячменю кути дещо більші (17,7° та 17,2° відповідно), забезпечуючи більш розподілений вплив на зернину.

Кількість ударних накладок є сталою для всіх культур (по 9 шт.), що вказує на універсальність конструкції робочого органу. Енергоємність процесу подрібнення варіюється залежно від культури: найнижче значення зафіксовано для пшениці (3,63 кВт·год/т), що свідчить про її найкращу схильність до руйнування, тоді як для кукурудзи та ячменю цей показник становить 4,15 та 6,76 кВт·год/т відповідно.

Частка пилоподібної фракції в готовому продукті (параметр a) також демонструє залежність від культури: найбільша кількість пилу утворюється при подрібненні кукурудзи (5,13%), що зумовлено її жорсткою структурою, тоді як для пшениці (1,71%) і ячменю (1,34%) цей показник суттєво нижчий, що свідчить про м'якіший характер подрібнення та менше енергетичне перевантаження матеріалу.

Ступінь подрібнення λ , який відображає співвідношення розмірів початкової та кінцевої фракцій, є найвищим у кукурудзи (7,22), що свідчить про інтенсивніше дроблення; для пшениці та ячменю значення λ становлять 3,55 та 3,66 відповідно, що вказує на менш глибоке подрібнення.

Таким чином, результати оптимізації параметрів підтверджують ефективність розробленого робочого органу, який забезпечує адаптивне подрібнення різних зернових культур із урахуванням їхніх фізико-механічних властивостей, дозволяючи досягати прийнятного балансу між енерговитратами, якістю отриманого продукту та зносостійкістю обладнання.

4.4 Порівняння результатів досліджень процесу подрібнення компонентів концентрованих кормів

Для порівняння результатів дослідження щодо раціональних значень конструктивно-технологічних параметрів дискового подрібнювача концентрованих кормів складена відповідна зведена таблиця 4.17.

Таблиця 4.17 – Порівняння результатів дослідження щодо раціональних значень конструктивно-технологічних параметрів дискового подрібнювача концентрованих кормів

Культура	Подрібнювач	Базовий	Удосконалений	
	Метод дослідження	експер.	Модел.	Експер.
Кукурудза	Подача зерна в камеру подрібнення G , кг/год	903	—	—
	Модульний зазор між дисками δ , мм	0,71	0,78	—
	Частота обертання диска n , об/хв	1642	1865	1764
	Кут встановлення ударних накладок β , °	—	21,9	15,9
	Кількість ударних накладок z , шт.	—	—	9
	Енергоємність процесу подрібнення q , кВт·год/т	4,81	—	4,15
	Частка пилоподібної фракції в подрібненій масі a , %	9,98	—	5,13
	Ступінь подрібнення λ	7,57	—	7,22
Пшениця	Подача зерна в камеру подрібнення G , кг/год	923	—	—
	Модульний зазор між дисками δ , мм	0,72	0,68	—
	Частота обертання диска n , об/хв	1500	1503	1500
	Кут встановлення ударних накладок β , °	—	21,8	17,7
	Кількість ударних накладок z , шт.	—	—	9
	Енергоємність процесу подрібнення q , кВт·год/т	3,85	—	3,63
	Частка пилоподібної фракції в подрібненій масі a , %	3,07	—	1,71
	Ступінь подрібнення λ	3,35	—	3,55
Ячмінь	Подача зерна в камеру подрібнення G , кг/год	1057	—	—
	Модульний зазор між дисками δ , мм	0,73	0,79	—
	Частота обертання диска n , об/хв	1500	1676	1500
	Кут встановлення ударних накладок β , °	—	25,3	17,2
	Кількість ударних накладок z , шт.	—	—	9
	Енергоємність процесу подрібнення q , кВт·год/т	7,07	—	6,76
	Частка пилоподібної фракції в подрібненій масі a , %	2,11	—	1,34
	Ступінь подрібнення λ	3,30	—	3,66

Порівняння результатів дослідження щодо раціональних значень конструктивно-технологічних параметрів дискового подрібнювача концентрованих кормів виявило низку відхилень між базовим і удосконаленим варіантами, як за результатами експериментальних досліджень, так і моделювання. Ці відхилення пояснюються конструктивними особливостями та технологічними удосконаленнями, які впливають на ефективність процесу подрібнення.

Зокрема, зменшення енергоємності процесу у випадку удосконалених конструкцій пояснюється використанням ударних накладок, які забезпечують більш інтенсивне та ефективне руйнування зерна завдяки комбінованій дії стискання, зсуву та удару. Це дозволяє знизити опір подрібненню і, відповідно, зменшити витрати енергії. Наприклад, для кукурудзи енергоємність знизилася з 4,81 до 4,15 кВт·год/т, для ячменю – з 7,07 до 6,76 кВт·год/т. Зниження частки пилоподібної фракції обумовлено оптимізацією кута встановлення ударних накладок – у межах 15–18°, що забезпечує більш контрольоване подрібнення без надмірного руйнування зерна до пилоподібного стану. Так, для пшениці частка пилоподібної фракції зменшилася з 3,07% до 1,71%, а для ячменю – з 2,11% до 1,34%.

Відхилення у ступені подрібнення пояснюються збільшенням частоти обертання робочих органів. Хоча ударні накладки зменшують ймовірність надмірного подрібнення частинок, зростання частоти компенсує це, дозволяючи досягти або навіть перевищити початковий ступінь подрібнення. Наприклад, для пшениці ступінь подрібнення зріс з 3,35 до 3,55, а для ячменю – з 3,30 до 3,66. У випадку кукурудзи спостерігається незначне зменшення ступеня подрібнення з 7,57 до 7,22, що на фоні суттєвого зменшення пилоподібної фракції (з 9,98% до 5,13%) можна вважати допустимим компромісом.

Зміна частоти обертання дисків у бік зростання (наприклад, з 1642 до 1764 об/хв для кукурудзи) обумовлена необхідністю забезпечення достатньої кінетичної енергії для ефективної роботи ударних елементів. Водночас модульний зазор між дисками оптимізується індивідуально для кожної культури залежно від розміру зерна, його твердості та еластичності. Так, для пшениці доцільним виявилось зменшення зазору з 0,72 до 0,68 мм, тоді як для кукурудзи й ячменю – збільшення до 0,78–0,79 мм.

Оптимальний кут встановлення ударних накладок, який у результатах моделювання коливався у межах 21–25°, в реальних умовах був зменшений до 15–18° для зменшення зносу та збереження цілісності подрібненої фракції. Таким чином, усі зазначені відхилення є результатом цілеспрямованої оптимізації параметрів роботи подрібнювача, що дозволяє досягти кращої якості продукту при нижчих енерговитратах. Це підтверджує ефективність удосконалень конструкції дискового

подрібнювача та доцільність індивідуального налаштування режимів подрібнення залежно від виду сировини.

4.5 Висновки до розділу

1. На основі проведених лабораторних досліджень встановлено особливості геометричних параметрів і маси зернин гібрида кукурудзи П8816, пшениці сорту «Патрас» та ячменю сорту «Снігова Королева», що мають принципове значення для розуміння механізмів руйнування при стиску та подальшого моделювання процесів подрібнення. За результатами статистичної обробки (табл. 4.1–4.3) встановлено, що середня довжина зернини кукурудзи становить $11,12 \pm 1,02$ мм, середня ширина – $8,09 \pm 0,88$ мм, а середня товщина – $4,73 \pm 0,85$ мм; середня довжина зернини пшениці – $6,70 \pm 0,63$ мм, середня ширина – $3,19 \pm 0,30$ мм, середня товщина – $2,89 \pm 0,25$ мм; середня довжина зернини ячменю – $9,31 \pm 0,21$ мм, середня ширина – $3,49 \pm 0,13$ мм та середня товщина – $2,79 \pm 0,10$.

2. У ході лабораторних досліджень встановлено, що сила руйнування зернин кукурудзи, пшениці та ячменю значно залежить від їх просторового положення під час стиску. Найвищу міцність продемонстрували зерна гібрида кукурудзи П8816, пшениці сорту «Патрас» й ячменя сорту «Снігова Королева» в горизонтальному положенні (363 ± 187 Н, 267 ± 44 і 270 ± 32 Н відповідно). У кукурудзи спостерігався сильний негативний зв'язок між висотою зернини та силою руйнування ($r = -0,56$), тоді як у пшениці та ячменю найвпливовішим параметром була ширина ($r = 0,48$). Горизонтальне положення у всіх випадках забезпечувало максимальну силу руйнування при найменшому впливі геометричних факторів, що свідчить про ефективніше передавання навантаження перпендикулярно осі зернини. Гістограми (рис. 4.4–4.6) підтвердили ці висновки: розподіл сили був ширшим і зміщеним у положеннях з меншою міцністю, тоді як у горизонтальному – більш концентрованим. Отримані результати мають практичне значення для подальшого чисельного моделювання.

3. В результаті експериментальних досліджень базового дискового подрібнювача встановлені закономірності зміни питомої енергоемності подрібнення зерна кукурудзи, пшениці і ячменю q (4.4)–(4.6), частки пилоподібної фракції в подрібненій масі зерна a (4.10)–(4.12), ступеня подрібнення λ (4.16)–(4.18) від подачі G , модульного зазору між дисками δ та частоти обертання диска n . Залежно від фізико-механічних властивостей зерна (кукурудзи, пшениці, ячменю), визначено раціональні параметри ($G = 903\text{--}1057$ кг/год, $\delta = 0,71\text{--}0,73$ мм, $n = 1500\text{--}1642$ об/хв) і енерговитрати ($q = 3,85\text{--}7,07$ кВт·год/т), що дозволяє знизити частку пилоподібної фракції ($a = 2,11\text{--}9,98$ %), досягти потрібного ступеня подрібнення ($\lambda = 3,30\text{--}7,57$).

4. В результаті експериментальних досліджень удосконаленого дискового подрібнювача встановлені закономірності зміни питомої енергоемності подрібнення зерна кукурудзи, пшениці і ячменю q (4.22)–(4.24), частки пилоподібної фракції в подрібненій масі зерна a (4.28)–(4.30), ступеня подрібнення λ (4.34)–(4.36) від кута встановлення ударних накладок β , кількості ударних накладок на одному диску z , частоти обертання робочого органу n . Спираючись на побудованих моделях було здійснено чисельну оптимізацію (3.8) з метою визначення таких комбінацій факторів (табл. 4.16), за яких досягається мінімальне значення питомої енергоемності q та частки пилоподібної фракції у продукті подрібнення a при визначеному діапазоні ступеня подрібнення λ . Аналіз отриманих даних свідчить про досягнення оптимального поєднання технологічної ефективності та енергетичної доцільності при подрібненні кукурудзи, пшениці та ячменю. Частота обертання n (1500–1764 об/хв), кут встановлення ударних накладок β (15,9–17,7 °) та кількість ударних накладок z (9 шт.) були адаптовані під фізико-механічні властивості кожної культури. Найбільша енергоемність q спостерігались при обробці ячменю (6,76 кВт·год/т), найменша – для пшениці ($q = 3,63$ кВт·год/т). Частка пилоподібної фракції в подрібненій масі a була найбільшою для кукурудзи (5,13 %), а найменшою – для ячменя (1,34 %). Отримані результати підтверджують ефективність конструктивних рішень подрібнювача для адаптивної обробки різних зернових.

5. Порівняльний аналіз результатів дослідження конструктивно-технологічних параметрів дискового подрібнювача концентрованих кормів засвідчив ефективність

удосконалень, спрямованих на підвищення технологічної якості подрібнення та зниження енерговитрат. Виявлені відхилення між базовими та удосконаленими варіантами пояснюються впровадженими конструктивними змінами — зокрема, використанням ударних накладок і оптимізацією режимів роботи. Це дозволило досягти зменшення питомої енергоємності на 4,38–13,72 %, зниження частки пилоподібної фракції на 36,5–48,6% та забезпечення раціонального ступеня подрібнення згідно рекомендацій (для кукурудзи в межах 7,2–9,4, а для пшениці і ячменя в межах 2–4). Інтеграція результатів експериментів і моделювання підтверджує доцільність індивідуального налаштування параметрів подрібнювача залежно від виду зернової сировини (табл. 4.17), що забезпечує збалансоване поєднання енергетичної ефективності та якості продукту.

Основні наукові результати, викладені в цьому розділі, знайшли відображення в публікаціях автора [173, 172, 176].

5 ВПРОВАДЖЕННЯ І ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНА ОЦІНКА РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕННЯ

5.1 Впровадження результатів дослідження

Виробничі випробування дискового подрібнювача концентрованих кормів (рис. 5.1) з обґрунтованими раціональними конструктивно-технологічними параметрами проводили в умовах кормоприготувального відділення ФГ «Моніка» (додаток Ж), с. Могилів, Дніпровського району Дніпропетровської області (рис. 5.1).

В господарстві утримуються свині породи Велика біла кількістю 197 голів одночасного утримання. Структуру поголів'я наведено в таблиці 5.1.

Таблиця 5.1 – Структура поголів'я фермерського господарства

Технологічна група	Голів у технологічній групі
Кнури	6
Свиноматки	21
Підсисні свиноматки з поросятами	5
Дорощування	110
Відгодівля	52
Ремонтні	3
Всього	197

Раціон годівлі в господарстві представлено в таблиці 5.2.

Випробування проводилися при параметрах представлених в таблиці 4.17.

Спочатку протягом робочої зміни подрібнювали зерно гібрида кукурудзи П8816 вологістю $9,4 \pm 0,4\%$, пшениці сорту «Патрас» вологістю $9,7 \pm 0,5\%$, та ячменя сорту «Снігова Королева» вологістю $9,1 \pm 0,4\%$ базовим дисковим подрібнювачем. Було отримано показники продуктивності та затраченої потужності для кожної культури. Визначення показників проводили відповідно до методик наведених у розділі 3.4. Наступної робочої зміни було випробувано подрібнювач з розробленим робочим органом. Отримані результати наведено в таблиці 5.3.

Таблиця 5.2 – Раціон годівлі в господарстві

Стадія	Середнє споживання корму, кг/добу	Кукурудза, %	Пшениця, %	Ячмінь, %	Соняшниковий шрот, %	Соєва макуха, %	Пшеничні висівки, %	Премікс, %
Дорощування	1,5	41	25	15	-	9	-	10
Відгодівля	2,5	35	32	14	14	-	3	2
Свиноматки	3	29	21	15	11	-	20	4
Підсисні свиноматки	6,4	30	28	10	14	6	8	4
Кнури	3,5	25	20	25	10	-	15	5



Рисунок 5.1 – Виробничі випробування дискового подрібнювача

Таблиця 5.3 – Результати випробування подрібнювачів

Параметр	Базовий подрібнювач			Удосконалений подрібнювач		
Культура	Кукурудза	Пшениця	Ячмінь	Кукурудза	Пшениця	Ячмінь
Продуктивність кг/год	121	149	75	174	184	120
Потужність Вт/год	582	574	527	722	669	812
Частка пилоподібної фракції, %	10,11	3,17	2,23	5,29	1,84	1,41

Таким чином для удосконаленого дискового подрібнювача фіксуємо підвищення продуктивності в середньому на 27,8% і збільшення необхідної потужності в середньому на 15,6%. При цьому частка пиловидної фракції зменшилася в середньому на 42,1%.

Отримані в дисертаційній роботі результати впроваджені та використані на виробництві ТОВ «Виробниче об'єднання «Восход», м. Дніпро. Підприємство отримало дослідний зразок і конструкторську документацію на розроблений дисковий подрібнювач концентрованих кормів та зацікавлене у виготовленні дослідної партії подрібнювачів комбікормів у кількості п'ять одиниць для виробничих випробувань і подальшого серійного виробництва (додаток Ж).

Результати досліджень впроваджено в навчальний процес інженерно-технологічного факультету ДДАЕУ (Додаток Ж) до дисципліни «Машини і обладнання та використання у тваринництві» для здобувачів освітнього рівня бакалавр за спеціальністю 208 «Агроінженерія». Практична робота «Механізація подрібнення концентрованих кормів». Мета роботи – вивчити конструкцію та робочий процес машин для подрібнення концентрованих кормів та методику розрахунку параметрів. Матеріальне забезпечення – дисковий подрібнювач та методики випробувань відповідно до дисертаційної роботи.

5.2 Техніко-економічна ефективність застосування удосконаленого дискового подрібнювача

Техніко-економічну оцінку дискового подрібнювача концентрованих кормів проводили відповідно до ДСТУ 4397-2005 [166] та з використанням методичних рекомендацій [180].

Вихідними даними для розрахунків були результати виробничих випробувань, наведені в розділі 5.1, раціон годівлі ФГ «Моніка» та кількість одночасно утримуваного поголів'я.

Результати розрахунків техніко-економічних показників удосконаленого дискового подрібнювача наведено в табл. 5.4 і додатку И.

Таблиця 5.4 – Техніко-економічні показники удосконаленого подрібнювача комбікормів

№	Показник	Базова конструкція	Удосконалена конструкція	%
1	Добова потреба в концентрованих кормах по фермі, кг	321,24	321,24	0
2	Річна потреба в концентрованих кормах по фермі, кг	117250,78	117250,78	0
3	Продуктивність дискового подрібнювача, кг/год	115	159	27,82
4	Потужність на привід дискового подрібнювача, кВт	0,593	0,703	15,64
5	Кількість операторів, чол.	1	1	0
6	Час роботи обладнання в протягом доби, год	2,80	1,97	-42,20
7	Вартість дискового подрібнювача, грн.	15800,00	18600,00	15,05
8	Витрати праці, люд-год.	1022,73	719,23	-42,20
9	Споживання електроенергії, кВт·год.	576,27	524,60	-9,85
10	Витрати на заробітну платню, грн.	49090,92	34522,86	-42,20
11	Витрати на електроенергію, грн.	2489,49	2266,27	-9,85
12	Амортизаційні відрахування, грн.	1264,00	1504,00	15,96
13	Відрахування на ремонт і ТО, грн.	951,81	1132,53	15,96
14	Загальні операційні витрати, грн	53796,22	39425,66	-36,45
15	Питомі операційні витрати, грн/кг	0,46	0,34	-36,45

№	Показник	Базова конструкція	Удосконалена конструкція	%
16	Інвестиції в переобладнання, грн	—	3000,00	—
17	Річний економічний ефект, грн	—	14370,56	—
18	Питомий річний економічний ефект, грн/кг	—	0,12	—
19	Строк окупності інвестицій у переобладнання подрібнювача, років	—	0,21	—

Результати техніко-економічної оцінки удосконаленого дискового подрібнювача свідчать, що в порівнянні з базовим подрібнювачем спостерігаємо суттєве зростання продуктивності на 27,82 % при збільшенні встановленої потужності на 15,64 %. Завдяки цьому скоротився час роботи обладнання протягом доби з 2,80 до 1,97 год, що призвело до зменшення витрат праці на 42,2 % та електроенергії на 9,85 %. Зі збільшенням вартості подрібнювача, зросли й амортизаційні відрахування та витрати на ремонт і технічне обслуговування на 15,96 %, однак загальні операційні витрати зменшилися на 36,45 %. У результаті питомі витрати на подрібнення знизилися на 32,42 %, що зумовило отримання річного економічного ефекту в розмірі 14370,56 грн та скорочення строку окупності інвестицій до 0,21 року. Таким чином, удосконалення конструкції подрібнювача забезпечує помітне підвищення ефективності його експлуатації та доцільне з економічної точки зору.

При річному завантаженні 117,25 т економія питомих операційних витрат складе 120 грн/т або 14370,56 грн на весь об'єм робіт, що дозволяє повернути інвестиції за період 0,21 року.

5.3 Висновки до розділу

1. Проведене впровадження та техніко-економічна оцінка результатів дослідження підтвердили доцільність удосконалення конструкції дискового подрібнювача концентрованих кормів. Виробничі випробування, що були здійснені у ФГ «Моніка», засвідчили покращення основних експлуатаційних показників.

Зокрема, удосконалена конструкція забезпечила збільшення продуктивності в середньому на 27,8 % та зменшення частки пилоподібної фракції в середньому на 42,1 %. Такі результати вказують на покращення якості подрібнення і зниження втрат корму.

2. Техніко-економічні розрахунки показали, що удосконалений дисковий подрібнювач кормів порівняно з базовим, при використанні на свинофермі (197 голів) із добовою потребою в концентрованих кормах 321,24 кг, дозволяє зменшити тривалість щоденної роботи обладнання з 2,80 до 1,97 години, що сприяє скороченню витрат праці на 42,2% та споживання електроенергії на 9,85 %. Попри збільшення вартості удосконаленого подрібнювача, загальні операційні витрати і питомі витрати зменшилися на 36,45 %. Це забезпечило річний економічний ефект у розмірі 14370,56 грн і строк окупності інвестицій – 0,21 року.

3. Результати досліджень були впроваджені на виробництві ТОВ «ВО «Восход», а також в освітній процес інженерно-технологічного факультету ДДАЕУ, що свідчить про практичну цінність та актуальність отриманих результатів. Удосконалений дисковий подрібнювач не лише покращив технічні показники, а й довів свою ефективність у реальних виробничих умовах, що обґрунтовує доцільність його серійного впровадження.

Основні наукові результати, викладені в цьому розділі, знайшли відображення в публікаціях автора [154].

ВИСНОВКИ

В роботі вирішена науково-технічна задача підвищення ефективності технологічного процесу подрібнення концентрованих кормів шляхом зниження питомих енерговитрат, поліпшення якості подрібненої продукції та обґрунтування раціональних конструктивно-технологічних параметрів дискового подрібнювача на основі встановлених емпіричних залежностей і розроблених фізико-математичних моделей чисельного моделювання.

За результатами проведених досліджень зроблено такі узагальнення:

1. Відповідно до результатів патентно-інформаційного аналізу обґрунтовано конструктивно-технологічну схему дискового подрібнювача концентрованих кормів, що працює за принципом ударного різання. Подрібнювач складається з корпусу та співвісно розташованих у ньому верхнього і нижнього дисків з центральними й периферійними зонами. Обидва диски оснащені внутрішніми конусами з ударними накладками, при цьому верхній диск має механізм регулювання осьового переміщення, що дає змогу встановлювати оптимальний зазор.

2. Чисельне моделювання процесів руйнування зерна методом дискретних елементів у середовищі Simcenter STAR-CCM+ дало змогу встановити кількісні закономірності впливу фізико-механічних властивостей зернових культур (кукурудзи, пшениці, ячменю), просторової орієнтації зернини та конструктивно-технологічних параметрів подрібнювача на силу руйнування F при стиску (2.27)–(2.35) та ударному різанні (2.45)–(2.53). Чисельне моделювання з використанням факторного планування дозволили уточнити матеріалознавчі параметри моделей зерна, зокрема модуль Юнга (E_p), коефіцієнт Пуассона (ν) та граничні напруги розтягу та зсуву (W_p), для кожної культури (табл. 2.6). Визначено раціональні значення відстані між ударними накладками $l = 1,59\text{--}1,99$ мм (або модульний зазор $\delta = 0,60\text{--}0,99$ мм), їхніх кутів встановлення $\beta = 21,8\text{--}25,3^\circ$ та швидкості руху $V = 4,72\text{--}5,86$ м/с (або частота обертання диска $n = 1503\text{--}1865$ об/хв), що враховують специфіку структури зерна та сприяють підвищенню ефективності й енергоощадності процесу подрібнення. Запропоновано інтегральний критерій оптимальності (2.54), який забезпечує баланс між мінімальною

силою руйнування та максимальною продуктивністю, і підтверджено доцільність його застосування для адаптивного налаштування параметрів подрібнювача під конкретний вид сировини.

3. Проведені лабораторні дослідження показали, що геометричні параметри та маса зернин кукурудзи, пшениці і ячменю (табл. 4.1–4.3) суттєво впливають на їх механічну міцність при стиску. Встановлено, що сила руйнування (рис. 4.4–4.6) залежить від просторового положення зерна: максимальна міцність досягається в горизонтальному положенні для кукурудзи (363 ± 187 Н), пшениці (267 ± 44) та ячменя (270 ± 32 Н). Наведені результати є важливою базою для проведеного чисельного моделювання процесу подрібнення.

4. В результаті експериментальних досліджень базового дискового подрібнювача встановлені закономірності зміни питомої енергоемності подрібнення зерна кукурудзи, пшениці і ячменя q (4.4)–(4.6), частки пилоподібної фракції в подрібненій масі зерна a (4.10)–(4.12), ступеня подрібнення λ (4.16)–(4.18) від подачі G , модульного зазору між дисками δ та частоти обертання диска n . Залежно від фізико-механічних властивостей зерна (кукурудзи, пшениці, ячменю), визначено раціональні параметри ($G = 903\text{--}1057$ кг/год, $\delta = 0,71\text{--}0,73$ мм, $n = 1500\text{--}1642$ об/хв) і енерговитрати ($q = 3,85\text{--}7,07$ кВт·год/т), що дозволяє знизити частку пилоподібної фракції ($a = 2,11\text{--}9,98$ %), досягти потрібного ступеня подрібнення ($\lambda = 3,30\text{--}7,57$).

5. В результаті експериментальних досліджень удосконаленого дискового подрібнювача встановлені закономірності зміни питомої енергоемності подрібнення зерна кукурудзи, пшениці і ячменю q (4.22)–(4.24), частки пилоподібної фракції в подрібненій масі зерна a (4.28)–(4.30), ступеня подрібнення λ (4.34)–(4.36) від кута встановлення ударних накладок β , кількості ударних накладок на одному диску z , частоти обертання робочого органу n . Спираючись на побудованих моделях було здійснено чисельну оптимізацію (3.8) з метою визначення таких комбінацій факторів (табл. 4.16), за яких досягається мінімальне значення питомої енергоемності q та частки пилоподібної фракції у продукті подрібнення a при визначеному діапазоні ступеня подрібнення λ . Аналіз отриманих даних свідчить про досягнення оптимального поєднання технологічної ефективності та енергетичної доцільності при

подрібненні кукурудзи, пшениці та ячменю. Частота обертання n (1500–1764 об/хв), кут встановлення ударних накладок β (15,9–17,7 °) та кількість ударних накладок z (9 шт.) були адаптовані під фізико-механічні властивості кожної культури. Найбільша енергоємність q спостерігались при обробці ячменю (6,76 кВт·год/т), найменша – для пшениці ($q = 3,63$ кВт·год/т). Частка пилоподібної фракції в подрібненій масі a була найбільшою для кукурудзи (5,13 %), а найменшою – для ячменя (1,34 %). Отримані результати підтверджують ефективність конструктивних рішень подрібнювача для адаптивної обробки різних зернових.

6. Порівняльний аналіз результатів дослідження конструктивно-технологічних параметрів дискового подрібнювача концентрованих кормів засвідчив ефективність удосконалень, спрямованих на підвищення технологічної якості подрібнення та зниження енерговитрат. Виявлені відхилення між базовими та удосконаленими варіантами пояснюються впровадженими конструктивними змінами — зокрема, використанням ударних накладок і оптимізацією режимів роботи. Це дозволило досягти зменшення питомої енергоємності на 4,4–13,7 %, зниження частки пилоподібної фракції на 36,5–48,6% та забезпечення раціонального ступеня подрібнення згідно рекомендацій (для кукурудзи в межах 7,2–9,4, а для пшениці і ячменя в межах 2–4). Інтеграція результатів експериментів і моделювання підтверджує доцільність індивідуального налаштування параметрів подрібнювача залежно від виду зернової сировини (табл. 4.17), що забезпечує збалансоване поєднання енергетичної ефективності та якості продукту.

7. Техніко-економічні розрахунки показали, що удосконалений дисковий подрібнювач кормів порівняно з базовим, при використанні на свинофермі (197 голів) із добовою потребою в концентрованих кормах 321,24 кг, дозволяє зменшити тривалість щоденної роботи обладнання з 2,80 до 1,97 години, що сприяє скороченню витрат праці на 42,2% та споживання електроенергії на 9,85%. Попри збільшення вартості удосконаленого подрібнювача, загальні операційні витрати і питомі витрати зменшилися на 36,45 %. Це забезпечило річний економічний ефект у розмірі 14370,56 грн і строк окупності інвестицій – 0,21 року.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. 20 CU.FT. WESTWOOD STAINLESS STEEL DOUBLE RIBBON BLENDER, 10 HP – Wohl Associates. (2022, March 21). Wohl Associates. Retrieved November 27, 2023, from <https://www.wohlassociates.com/used-mixers-ribbon-paddle/20-cu-ft-westwood-stainless-steel-double-ribbon-blender-10-hp.html>
2. Adaszyńska-Skwirzyńska, M., Konieczka, P., Bucław, M., Majewska, D., Pietruszka, A., Zych, S., & Szczerbińska, D. (2025). Analysis of the production and economic indicators of broiler chicken rearing in 2020–2023: A case study of a Polish farm. *Agriculture*, 15(2), 139. <https://doi.org/10.3390/agriculture15020139>
3. Adetifa, B., & Okewole, O. (2015). Characterisation of small scale feed mills in a developing country. *Agricultural Engineering International: The CIGR E-Journal*, 17, 208–216.
4. Alltech. (2024). *Agri-Food Outlook 2024* [PDF]. Alltech. Retrieved from <https://www.alltech.com/sites/default/files/2024-04/en-gl-agrifood-outlook-report-pdf-2024.pdf>
5. Amerah, A., Ravindran, V., Lentle, R., & Thomas, D. (2007). Feed particle size: Implications on the digestion and performance of poultry. *World S Poultry Science Journal*, 63(3), 439–455. <https://doi.org/10.1017/s0043933907001560>
6. Amerah, A., Ravindran, V., Lentle, R., & Thomas, D. (2007). Influence of feed particle size and feed form on the performance, energy utilization, digestive tract development, and digesta parameters of broiler starters. *Poultry Science*, 86(12), 2615–2623. <https://doi.org/10.3382/ps.2007-00212>
7. Amerah, A., Ravindran, V., Lentle, R., & Thomas, D. (2008). Influence of feed particle size on the performance, energy utilization, digestive tract development, and digesta parameters of broiler starters fed wheat- and Corn-Based diets. *Poultry Science*, 87(11), 2320–2328. <https://doi.org/10.3382/ps.2008-00149>
8. Andinisiwi, Y. P. (1999). Roller mill maintenance. www.academia.edu. https://www.academia.edu/24554351/Roller_Mill_Maintenance

9. Anitox. (2024, October 21). *Uncovering the hidden costs of feed efficiency in livestock production*. All About Feed. Retrieved November 27, 2024, from <https://www.allaboutfeed.net/animal-feed/feed-additives/uncovering-the-hidden-costs-of-feed-efficiency-in-livestock-production/>
10. Aniunoh, K. (2023, July 5). *Basics of starting a feed mill*. Insta-Pro. Retrieved November 27, 2023, from <https://www.insta-pro.com/en/blog/engineeringandextrusionprocess/basics-of-starting-a-feed-mill/>
11. Artmash. (2025, May 8). *Оцінка стану свиноводства України (2022–2024)*. АртМаш. <https://artmash.ua/article/otsenka-sostoyaniya-svinovodstva-ukrainy-20222024>
12. AzoM. (2012, September 18). *AISI 1026 Carbon Steel (UNS G10260)*. Retrieved October 5, 2022, from https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=6583&utm_
13. Barrios, G. K., Jiménez-Herrera, N., & Tavares, L. M. (2020). Simulation of particle bed breakage by slow compression and impact using a DEM particle replacement model. *Advanced Powder Technology*, 31(7), 2749–2758. <https://doi.org/10.1016/j.appt.2020.05.011>
14. Basinskas, G., & Sakai, M. (2015). Numerical study of the mixing efficiency of a ribbon mixer using the discrete element method. *Powder Technology*, 287, 380–394. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2015.10.017>
15. Basiouny, M., & El-Yamani, A. (2016). Performance evaluation of two different hammer mills for grinding corn cobs. *Journal of Soil Sciences and Agricultural Engineering /Journal of Soil Sciences and Agricultural Engineering*, 7(1), 77–87. <https://doi.org/10.21608/jssae.2016.39322>
16. Bassey, J. B., Odesola, I. F., & Olawuyi, J. A. (2022). A Comparative technique for performance evaluation of hammer mill and disk mill in yam flour processing. *World Journal of Engineering and Technology*, 10(03), 613–625. <https://doi.org/10.4236/wjet.2022.103040>
17. *Bico Pulverizer*. (n.d.). GlobalGilson.com. Retrieved August 5, 2023, from <https://www.globalgilson.com/bico-pulverizer>

18. Boac, J. M., Casada, M. E., Maghirang, R. G., & Harner, J. P. (2010). Material and interaction properties of selected grains and oilseeds for modeling discrete particles. *Transactions of the ASABE*, 53(4), 1201–1216. <https://doi.org/10.13031/2013.32577>
19. Boac, J., Casada, M., Pordesimo, L., Petingco, M., Maghirang, R., & Harner, J. (2023). Evaluation of particle models of corn kernels for discrete element method simulation of shelled corn mass flow. *Smart Agricultural Technology*, 4, 100197. <https://doi.org/10.1016/j.atech.2023.100197>
20. Box, G. E. P., & Behnken, D. W. (1960). Some New Three Level Designs for the Study of Quantitative Variables. *Technometrics*, 2(4), 455–475. <https://doi.org/10.1080/00401706.1960.10489912>
21. Boye, J., Zare, F., & Pletch, A. (2009). Pulse proteins: Processing, characterization, functional properties and applications in food and feed. *Food Research International*, 43(2), 414–431. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2009.09.003>
22. Chapter 18. *Feed Milling Processes*. (n.d.). Fao.org. Retrieved November 27, 2023, from <https://www.fao.org/4/x5738e/x5738e0j.htm>
23. Cole, N. A., & Todd, R. W. (2008). Nutrient management of feedlot cattle. *The Professional Animal Scientist*, 24(1), 1–8. [https://doi.org/10.15232/S1080-7446\(15\)30804-8](https://doi.org/10.15232/S1080-7446(15)30804-8)
24. Coşkun, M. B., Yalçın, İ., & Özarslan, C. (2005). Physical properties of sweet corn seed (*Zea mays* 180ritsch180te Sturt.). *Journal of Food Engineering*, 74(4), 523–528. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2005.03.039>
25. Cundall, P. A., & Strack, O. D. L. (1979). A discrete numerical model for granular assemblies. *Géotechnique*, 29(1), 47–65. <https://doi.org/10.1680/geot.1979.29.1.47>
26. Danfoss. (n.d.). *VLT® Micro Drive FC 51*. Retrieved April 12, 2023, from <https://www.danfoss.com/uk-ua/products/dds/low-voltage-drives/vlt-drives/vlt-micro-drive-fc-51>.
27. Denzel, M., Prenner, M., Sifferlinger, N. A., & Antretter, T. (2023). A breakage model for DEM based on a probabilistic particle replacement with Voronoi fragments. *Minerals Engineering*, 203, 108328. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2023.108328>

28. Dibner, J., & Richards, J. (2004). The digestive system: challenges and opportunities. *The Journal of Applied Poultry Research*, 13(1), 86–93. <https://doi.org/10.1093/japr/13.1.86>
29. *Disk mills – 181ritsch.de*. (n.d.). Retrieved August 9, 2023, from <https://www.fritsch-international.com/sample-preparation/milling/disk-mills/>
30. Donley, A. (2024, December 13). *FEFAC sees slight uptick in EU feed output*. World Grain. <https://www.world-grain.com/articles/20814-fefac-sees-slight-uptick-in-eu-feed-output>
31. Dudarev, I., et al. (2024). Increasing the Stability of Combined Feed During Its Storage. *Agrarian Bulletin of the Black Sea Littoral*, (111), 98–102. <https://doi.org/10.37000/abbsl.2024.111.18>
32. Dunmire, K. M., Stark, C. R., & Paulk, C. B. (2021). *Kansas State University Quality Feed Manufacturing Guide: Batching and Mixing*. Kansas State University.
33. Duranti, M., & Gius, C. (1997). Legume seeds: protein content and nutritional value. *Field Crops Research*, 53(1–3), 31–45. [https://doi.org/10.1016/s0378-4290\(97\)00021-x](https://doi.org/10.1016/s0378-4290(97)00021-x)
34. *EU Compound Feed Production Market Forecast 2024 | FEFAC*. (n.d.). <https://fefac.eu/newsroom/news/eu-compound-feed-production-market-forecast-2024/>
35. European Feed Manufacturers' Federation. (2025, May 2). *FEFAC publishes its Feed & Food Report 2024*. Feed & Additive Magazine. Retrieved from <https://www.feedandadditive.com/fefac-publishes-its-feed-food-report-2024/>
36. *FAO opens Global Forum for Animal Feed and Feed Regulators*. (2023, November 14). Newsroom. <https://www.fao.org/newsroom/detail/fao-opens-global-forum-for-animal-feed-and-feed-regulators/en>
37. Feed Strategy Staff. (2025, April 29). *Alltech survey reveals global feed production rebounds in 2024*. Feed & Grain. <https://www.feedandgrain.com/animal-feed-manufacturing/news/15744325/alltech-alltech-survey-reveals-global-feed-production-rebounds-in-2024>
38. Firatligil-Durmuş, E., Sýkorová, A., Šárka, E., Bubník, Z., Schejbal, M., & Příhoda, J. (2010). Geometric parameters of wheat grain determined by image analysis and

FEM approach. *Cereal Research Communications*, 38(1), 122–133.
<https://doi.org/10.1556/crc.38.2010.1.13>

39. Foeth. (n.d.). *Winkworth WT1000 – mieszalnik lopatkowy*. Retrieved November 27, 2023, from <https://www.foeth.com/pl/mieszalniki/mieszalniki-lopatkowe/winkworth-wt1000-mieszalnik-lopatkowy-246s157/>

40. Francis, D. W., Conservation, C. I. P. F. E., & Efficiency, C. O. O. E. (2004). *Energy cost reduction in the pulp and paper industry: An Energy Benchmarking Perspective*. Ressources naturelles Canada.

41. Gao, H., Madsen, P., Pösö, J., Aamand, G., Lidauer, M., & Jensen, J. (2018). Short communication: Multivariate outlier detection for routine Nordic dairy cattle genetic evaluation in the Nordic Holstein and Red population. *Journal of Dairy Science*, 101(12), 11159–11164. <https://doi.org/10.3168/jds.2018-15123>

42. Gao, P., Tian, S., Xue, X., & Lu, J. (2024). Determination methods and influencing factors of grain mechanical properties. *Journal of Food Quality*, 2024, 1–12. <https://doi.org/10.1155/2024/3407485>

43. Ghimpețeanu, O. M., Pogurschi, E. N., Popa, D. C., Dragomir, N., Drăgoțoiu, T., Mihai, O. D., & Petcu, C. D. (2022). Antibiotic Use in Livestock and Residues in Food—A Public Health Threat: A review. *Foods*, 11(10), 1430. <https://doi.org/10.3390/foods11101430>

44. Givens, D. I., Davies, T. W., & Laverick, R. M. (2000). Dietary fibre fractions in hulled and naked winter oat grain: effects of cultivar and various agronomic factors. *SCI Journals*. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1097-0010\(200003\)80:4](https://doi.org/10.1002/(SICI)1097-0010(200003)80:4)

45. Gomaa, I. M., Kashapov, I. I., Khaidarov, R. R., Sabirov, R. F., & Khasanova, F. F. (2020). Technological factors influence on the work efficiency of the feed grinder. *BIO Web of Conferences*, 17, 00233. <https://doi.org/10.1051/bioconf/20201700233>

46. Gunstone, F. D. (2002). *Vegetable Oils in Food Technology: Composition, Properties and Uses*. Blackwell Publishing. <https://doi.org/10.1002/9781444339925.ch1>

47. Gupta, V., Sun, X., Xu, W., Sarv, H., & Farzan, H. (2017). A discrete element method-based approach to predict the breakage of coal. *Advanced Powder Technology*, 28(10), 2665–2677. <https://doi.org/10.1016/j.appt.2017.07.019>

48. Herbold, K., & Watzelt, H. (2007). *Disc mill* (U.S. Patent No. 7,018,172). U.S. Patent and Trademark Office. Retrieved from <https://patents.google.com/patent/US20070181723A1/en>
49. Ilić, Ivan. *Feed Mill Efficiency and Profitability in 2022*. EW Nutrition, 2022. https://ew-nutrition.com/wp-content/uploads/gallery/pdf/13_ivan-ilic_feed-mill-efficiency.pdf
50. Ishihara, S., Kushimoto, K., & Kano, J. (2020). Analysis of the effect of ventilation bars on the packing structure of sinter bed by DEM Simulation. *Energies*, 13(15), 3836. <https://doi.org/10.3390/en13153836>
51. Jaelani, A., Rostini, T., Sugiarti, M. I. Z. S., & Fitryani, R. (2024). Maintaining the physical quality and digestibility of pellet feed through the use of plant-based pellet binder. *Journal of Advanced Veterinary and Animal Research*, 0, 1. <https://doi.org/10.5455/javar.2024.k752>
52. Johnson, K. L., Kendall, K., & Roberts, A. D. (1971). Surface energy and the contact of elastic solids. *Proceedings of the Royal Society of London a Mathematical and Physical Sciences*, 324(1558), 301–313. <https://doi.org/10.1098/rspa.1971.0141>
53. Jose, C. (2025, May 1). Global feed production increases by 1.2% in 2024, according to Alltech survey – Milling and Grain. *Milling and Grain*. <https://millingandgrain.com/global-feed-production-increases-by-1-2-in-2024-according-to-alltech-survey/>
54. Kamo, R., Takaya, Y., Okuyama, K., Iwamoto, M., Sekine, Y., & Tokoro, C. (2024). DEM-CFD study with a breakage model for elucidating the grinding mechanism in cutter-type disk mill. *Powder Technology*, 446, 120156. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2024.120156>
55. Kansas State University. (2018). *Economics in swine nutrition* [Fact sheet]. Kansas State University Applied Swine Nutrition. Retrieved from <https://www.asi.k-state.edu/extension/swine/swinenutritionguide/pdf/KSU%20Economics%20in%20Swine%20Nutrition%20fact%20sheet.pdf>
56. Karmoker, J. R., Hasan, I., Ahmed, N., Saifuddin, M., & Reza, M. S. (2019). Development and optimization of acyclovir loaded mucoadhesive microspheres by box –

Behnken Design. *Dhaka University Journal of Pharmaceutical Sciences*, 18(1), 1–12. <https://doi.org/10.3329/dujps.v18i1.41421>

57. Kiarie, E. G., & Mills, A. (2019). Role of feed processing on gut health and function in pigs and poultry: conundrum of optimal particle size and hydrothermal regimens. *Frontiers in Veterinary Science*, 6. <https://doi.org/10.3389/fvets.2019.00019>

58. Kiarie, E., Romero, L. F., & Nyachoti, C. M. (2013). The role of added feed enzymes in promoting gut health in swine and poultry. *Nutrition research reviews*, 26(1), 71–88. <https://doi.org/10.1017/S0954422413000048>

59. Klein, H. (2023, February 9). *Disc mill as an energy-saving alternative*. De Molenaar. Retrieved November 10, 2023, from <https://www.demolenaar.nl/en/technology/save-energy/disc-mill-as-energy-saving-alternative/48702/>

60. Kosaku, Y., Tsunazawa, Y., & Tokoro, C. (2022). A coarse grain model with parameter scaling of adhesion forces from liquid bridge forces and JKR theory in the discrete element method. *Chemical Engineering Science*, 268, 118428. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2022.118428>

61. Kruggel-Emden, H., Rickelt, S., Wirtz, S., & Scherer, V. (2008). A study on the validity of the multi-sphere Discrete Element Method. *Powder Technology*, 188(2), 153–165. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2008.04.037>

62. Kruszelnicka, W., Hlosta, J., Diviš, J., & Gierz, Ł. (2021). Study of the Relationships between Multi-Hole, Multi-Disc Mill Performance Parameters and Comminution Indicators. *Sustainability*, 13(15), 8260. <https://doi.org/10.3390/su13158260>

63. Kruszelnicka, W., Opielak, M., Ambrose, K., Pukalskas, S., Tomporowski, A., & Walichnowska, P. (2022). Energy-Dependent particle size distribution models for Multi-Disc mill. *Materials*, 15(17), 6067. <https://doi.org/10.3390/ma15176067>

64. Kubík, Ľ., Božíková, M., & Kažimírová, V. (2021). Mechanical properties of wheat grains at compression. *Acta Technologica Agriculturae*, 24(4), 202–208. <https://doi.org/10.2478/ata-2021-0033>

65. Kushimoto, K., Ishihara, S., & Kano, J. (2019). Development of ADEM–CFD model for analyzing dynamic and breakage behavior of aggregates in wet ball milling.

Advanced Powder Technology, 30(6), 1131–1140.
<https://doi.org/10.1016/j.appt.2019.03.008>

66. Laurinen, P., Siljander-Rasi, H., Karhunen, J., Alaviuhkola, T., Näsi, M., & Tuppi, K. (2000). Effects of different grinding methods and particle size of barley and wheat on pig performance and digestibility. *Animal Feed Science and Technology*, 83, 1–16.
[https://doi.org/10.1016/S0377-8401\(99\)00116-9](https://doi.org/10.1016/S0377-8401(99)00116-9)

67. Leeson, S., & Summers, J. D. (2005). *Commercial Poultry Nutrition* (3rd ed.). Nottingham University Press. Retrieved from https://www.agropustaka.id/wp-content/uploads/2020/04/agropustaka.id_buku_Commercial-Poultry-Nutrition-3rd-Edition-by-S.-Leeson-J.-D.-Summers.pdf

68. Leeson, S., & Summers, J.D. (2001). *Nutrition of the chicken*.

69. Liu, M., Zhao, L., Gong, G., Zhang, L., Shi, L., Dai, J., Han, Y., Wu, Y., Khalil, M. M., & Sun, L. (2022). Invited review: Remediation strategies for mycotoxin control in feed. *Journal of Animal Science and Biotechnology/Journal of Animal Science and Biotechnology*, 13(1). <https://doi.org/10.1186/s40104-021-00661-4>

70. Liu, Z., Ma, H., & Zhao, Y. (2021). Comparative study of discrete element modeling of tablets using multi-spheres, multi-super-ellipsoids, and polyhedrons. *Powder Technology*, 390, 34–49. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2021.05.065>

71. Lomovski, I., Bychkov, A., Lomovsky, O., & Skripkina, T. (2020). Mechanochemical and size reduction machines for biorefining. *Molecules*, 25(22), 5345. <https://doi.org/10.3390/molecules25225345>

72. Lyu, F., Thomas, M., Hendriks, W., & Van Der Poel, A. (2019). 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>

73. Ma, D., Zhu, T., Yang, F., Zhang, S., & Huang, C. (2021). Effects of corn particle size on energy and nutrient digestibility in diets fed to young pigs and adult sows. *Animal Bioscience*, 34(9), 1491–1498. <https://doi.org/10.5713/ab.20.0556>

74. Markauskas, D., & Kačianauskas, R. (2010). Investigation of rice grain flow by multi-sphere particle model with rolling resistance. *Granular Matter*, 13(2), 143–148.

<https://doi.org/10.1007/s10035-010-0196-5>

75. Markauskas, D., Ramírez-Gómez, Á., Kačianauskas, R., & Zdancevičius, E. (2015). Maize grain shape approaches for DEM modelling. *Computers and Electronics in Agriculture*, 118, 247–258. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2015.09.004>
76. McDonald, P., Edwards, R. A., Greenhalgh, J. F. D., Morgan, C. A., Sinclair, L. A., & Wilkinson, R. G. (2011). *Animal Nutrition* (7th ed.). Pearson Education.
77. McLaren, D., & Hunter, F. (2009). New aspects of rotary querns in Scotland. *Proceedings of the Society of Antiquaries of Scotland*, 138, 105–128. <https://doi.org/10.9750/psas.138.105.128>
78. Messina, M. J. (1999). Legumes and soybeans: overview of their nutritional profiles and health effects. *American Journal of Clinical Nutrition*, 70(3), 439S-450S. <https://doi.org/10.1093/ajcn/70.3.439s>
79. *MHP produces 30% of compound feed in Ukraine*. (n.d.). Large Scale Agriculture. Retrieved November 28, 2022, from <https://www.largescaleagriculture.com/home/news-details/mhp-produces-30-of-compound-feed-in-ukraine>
80. Molenda, M., & Horabik, J. (Eds.). (2005). *Mechanical properties of granular agro-materials and food powders for industrial practice. Part I: Characterization of mechanical properties of particulate solids for storage and handling*. Institute of Agrophysics, Polish Academy of Sciences. ResearchGate. <https://doi.org/10.13140/2.1.2810.144>.
81. Molenda, M., & Stasiak, M. (2002). *Determination of the elastic constants of cereal grains in a uniaxial compression test*. International Agrophysics – Tom 16, Numer 1 (2002) – AGRO – Yadda. <https://agro.icm.edu.pl/agro/element/bwmeta1.element.agro-article-6d1930f7-8a35-42fa-a445-54e2d8e139dd>
82. Muir, A. D. (2006). Flax lignans—Analytical methods and health benefits. *Journal of AOAC International*, 89(4), 1147-1157. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/16915858/>

83. Myers, R. H., Montgomery, D. C., & Anderson-Cook, C. M. (2016). *Response Surface Methodology: Process and Product Optimization Using Designed Experiments*. John Wiley & Sons.
84. Nagata, Y., Minagawa, M., Hisatomi, S., Tsunazawa, Y., Okuyama, K., Iwamoto, M., Sekine, Y., & Tokoro, C. (2019). Investigation of optimum design for nanoparticle dispersion in centrifugal bead mill using DEM-CFD simulation. *Advanced Powder Technology*, 30(5), 1034–1042. <https://doi.org/10.1016/j.appt.2019.02.018>
85. Nagata, Y., Tsunazawa, Y., Tsukada, K., Yaguchi, Y., Ebisu, Y., Mitsuhashi, K., & Tokoro, C. (2020). Effect of the roll stud diameter on the capacity of a high-pressure grinding roll using the discrete element method. *Minerals Engineering*, 154, 106412. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2020.106412>
86. National Research Council. (1994). Nutrient requirements of poultry. In *National Academies Press eBooks*. <https://doi.org/10.17226/2114>
87. New Standard Group. (n.d.). *The Disc Mill: Old technology, with new advances and advantages*. New Standard Group – New Standard Provides New Generation Technologies and Ideas to Promote Sustainable and Profitable Animal Husbandry in Every Hog and Poultry Barn Design. Retrieved January 30, 2022, from <https://newstandardag.com/2024/08/28/the-disc-mill-old-technology-with-new-advances-and-advantages/>
88. News – Difference between ribbon blender and paddle mixer. (2022, February 23). TOPS. Retrieved November 27, 2024, from <https://www.topspacking.com/news/difference-between-ribbon-blender-and-paddle-mixer/>
89. Nied, R. (2007). Chapter 5 Rotor Impact Mills. In *Handbook of powder technology* (pp. 229–249). [https://doi.org/10.1016/s0167-3785\(07\)12008-x](https://doi.org/10.1016/s0167-3785(07)12008-x)
90. Niu, G., Zhang, T., Cao, S., Zhang, X., & Tao, L. (2023). Effect of corn grinding methods and particle size on the nutrient digestibility of chahua chickens. *Animals*, 13(14), 2364. <https://doi.org/10.3390/ani13142364>
91. Nutrient requirements of dairy cattle. (2001). In *National Academies Press eBooks*. <https://doi.org/10.17226/9825>

92. Nutrient requirements of swine. (2012). In *National Academies Press eBooks*.
<https://doi.org/10.17226/13298>
93. Paulk, C. B., Stark, C. R., & Dunmire, K. M. (2022). Feed processing technology and quality of feed. In L. I. Chiba (Ed.), *Sustainable swine nutrition* (Chapter 16). Wiley. <https://doi.org/10.1002/9781119583998.ch16>
94. Pierozan, C. R., Agostini, P. S., Gasa, J., Novais, A. K., Dias, C. P., Santos, R. S. K., Pereira, M., Jr, Nagi, J. G., Alves, J. B., & Silva, C. A. (2016). Factors affecting the daily feed intake and feed conversion ratio of pigs in grow-finishing units: the case of a company. *Porcine Health Management*, 2(1). <https://doi.org/10.1186/s40813-016-0023-4>
95. Piskun, V., Yatsenko, Y., Antonenko, S., & Zolotarov, A. (2024). PRODUCTION OF COMPOUND FEEDS IN THE CONDITIONS OF FARMS WITH LOADED RESERVATION OF DOSING AND MIXING. *The Scientific and Technical Bulletin of the Institute of Animal Science NAAS of Ukraine*, 132, 124–139. <https://doi.org/10.32900/2312-8402-2024-132-124-139>
96. Potyondy, D., & Cundall, P. (2004). A bonded-particle model for rock. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 41(8), 1329–1364. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2004.09.011>
97. Pro-Consulting. (2025, May 10). *Аналіз ринку комбікормів в Україні (2019–2023 pp.)*. InVenture. Retrieved from <https://inventure.com.ua/uk/analytics/investments/analiz-rinku-kombikormiv-v-ukrayini>
98. Pro-Consulting.ua. (2024, March 1). *Ринок комбікорму в Україні: актуальна інформація про сферу бізнесу*. <https://pro-consulting.ua/ua/pressroom/rynok-kombikorma-v-ukraine-aktualnaya-informaciya-o-sfere-biznesa>
99. *Pulverizers*. (n.d.). GlobalGilson.com. Retrieved March 9, 2022, from <https://www.globalgilson.com/pulverizers>
100. Ramaj, I., Romuli, S., Schock, S., & Müller, J. (2024). Discrete element modelling of bulk behaviour of wheat (*Triticum aestivum* L.) cv. ‘Pionier’ during compressive loading. *Biosystems Engineering*, 242, 123–139. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2024.04.005>

101. Raza, A., Bashir, S., & Tabassum, R. (2019). An update on carbohydrases: growth performance and intestinal health of poultry. *Heliyon*, 5(4), e01437. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2019.e01437>
102. Rodehutschord, M., Rückert, C., Maurer, H. P., Schenkel, H., Schipprack, W., Knudsen, K. E. B., Schollenberger, M., Laux, M., Eklund, M., Siegert, W., & Mosenthin, R. (2016). Variation in chemical composition and physical characteristics of cereal grains from different genotypes. *Archives of Animal Nutrition*, 70(2), 87–107. <https://doi.org/10.1080/1745039x.2015.1133111>
103. Ryan. (2024, August 9). *The science of grind consistency and its impact on espresso quality*. Specialty Batch Coffee. Retrieved October 17, 2024, from https://specialtybatch.com/grind-consistency-and-its-impact-on-espresso-quality/?srsltid=AfmBOop4dI-73SitdliG9F7Sa1ScenA3a-VmCuPxA3Kq4NP_aPovjXH9
104. S.M.L. Kabir, M.M. Rahman, M.B. Rahman, M.M. Rahman, & S.U. Ahmed. (2004). The dynamics of probiotics on growth performance and immune response in broilers. *International Journal of Poultry Science*, 3(5), 361–364. <https://doi.org/10.3923/ijps.2004.361.364>
105. Sakaguchi, H., Ozaki, E., & Igarashi, T. (1993). Plugging of the Flow of Granular Materials during the Discharge from a Silo. *International Journal of Modern Physics B*, 07(09n10), 1949–1963. <https://doi.org/10.1142/s0217979293002705>
106. Seifi, M. R., & Alimardani, R. (2010). The moisture content effect on some physical and mechanical properties of corn (Sc 704). *Journal of Agricultural Science*, 2(4), 125–134. <https://doi.org/10.5539/jas.v2n4p125>
107. Shehata, A. A., Yalçın, S., Latorre, J. D., Basiouni, S., Attia, Y. A., El-Wahab, A. A., Visscher, C., El-Seedi, H. R., Huber, C., Hafez, H. M., Eisenreich, W., & Tellez-Isaias, G. (2022). Probiotics, prebiotics, and phytogenic substances for optimizing gut health in poultry. *Microorganisms*, 10(2), 395. <https://doi.org/10.3390/microorganisms10020395>
108. Shewry, P. R., & Hey, S. J. (2015). The contribution of wheat to human diet and health. *Food and Energy Security*, 4(3), 178–202.

109. Shi, F. (2016). A review of the applications of the JK size-dependent breakage model. *International Journal of Mineral Processing*, 155, 118–129. <https://doi.org/10.1016/j.minpro.2016.08.012>
110. Shi, F. (2016). A review of the applications of the JK size-dependent breakage model Part 2: Assessment of material strength and energy requirement in size reduction. *International Journal of Mineral Processing*, 157, 36–45. <https://doi.org/10.1016/j.minpro.2016.09.009>
111. Shi, F. (2016). A review of the applications of the JK size-dependent breakage model Part 3: Comminution equipment modelling. *International Journal of Mineral Processing*, 157, 60–72. <https://doi.org/10.1016/j.minpro.2016.09.011>
112. Shike, J. (2025, May 13). *Global feed production rebounds, says AllTech in Agri-Food Outlook*. Pork Business. <https://www.porkbusiness.com/news/industry/global-feed-production-rebounds-alltech-says-agri-food-outlook>
113. *SKIOLD DOCS* » *Disc_Mill_SK5000_Data_Sheet_EN.pdf*. (n.d.). Retrieved December 3, 2022, from <https://docs.skiold.com/share/s/uWgUTNPtRYu795IPFOZrBQ>
114. *SKIOLD DOCS* » *Disc_mills_leaflet_EN.pdf*. (n.d.). Retrieved December 3, 2022, from https://docs.skiold.com/share/s/K_td1v4MR0qjl-KSKxaM8w
115. Sologubik, C., Campañone, L., Pagano, A., & Gely, M. (2012). Effect of moisture content on some physical properties of barley. *Industrial Crops and Products*, 43, 762–767. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2012.08.019>
116. Tarrant, K. J., Fulton, J. E., Lund, A., Rhoads, D. D., & Anthony, N. B. (2018). Predicting ascites incidence in a simulated altitude-challenge using single nucleotide polymorphisms identified in multi-generational genome wide association studies. *Poultry Science*, 97(11), 3801–3806. <https://doi.org/10.3382/ps/pey273>
117. Tavakoli, M., Tavakoli, H., Rajabipour, A., Ahmadi, H., & Gharib-Zahedi, S. M. T. (2009). Moisture-dependent physical properties of barley grains. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 2(4), 84–91. <http://dx.doi.org/10.3965/j.issn.1934-6344.2009.04.084-091>

118. Tavares, L. M. (2008). Analysis of particle fracture by repeated stressing as damage accumulation. *Powder Technology*, 190(3), 327–339. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2008.08.011>
119. *The State of Food and Agriculture 2003–04 | Agrifood Economics | Food and Agriculture Organization of the United Nations*. Retrieved from <https://www.fao.org/agrifood-economics/publications/detail/en/c/123331/>
120. Thomas, M., Hendriks, W., & Van Der Poel, A. (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>
121. Thomas, M., Vrij, M., Zandstra, T., & Van Der Poel, A. (2012). Grinding performance of wheat, maize and soybeans in a multicracker system. *Animal Feed Science and Technology*, 175(3–4), 182–192. <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2012.05.002>
122. Tokoro, C., Tsunazawa, Y., Tsusaka, N., Tahara, K., & Owada, S. (2012). Fundamental study of parts detachment mechanism from wasted printed circuit boards in agitation mill. *Resources Processing*, 59(1), 27–32. <https://doi.org/10.4144/RPSJ.59.27>
123. Tsuji, Y., Kawaguchi, T., & Tanaka, T. (1993). Discrete particle simulation of two-dimensional fluidized bed. *Powder Technology*, 77(1), 79–87. [https://doi.org/10.1016/0032-5910\(93\)85010-7](https://doi.org/10.1016/0032-5910(93)85010-7)
124. Tsunazawa, Y., Fujihashi, D., Fukui, S., Sakai, M., & Tokoro, C. (2016). Contact force model including the liquid-bridge force for wet-particle simulation using the discrete element method. *Advanced Powder Technology*, 27(2), 652–660. <https://doi.org/10.1016/j.appt.2016.02.021>
125. Tsunazawa, Y., Hisatomi, S., Murakami, S., & Tokoro, C. (2018). Investigation and evaluation of the detachment of printed circuit boards from waste appliances for effective recycling. *Waste Management*, 78, 474–482. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2018.06.024>
126. Tsunazawa, Y., Shigeto, Y., Tokoro, C., & Sakai, M. (2015). Numerical simulation of industrial die filling using the discrete element method. *Chemical Engineering Science*, 138, 791–809. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2015.09.014>

127. Tsunazawa, Y., Soma, N., & Sakai, M. (2021). DEM study on identification of mixing mechanisms in a pot blender. *Advanced Powder Technology*, 33(1), 103337. <https://doi.org/10.1016/j.appt.2021.10.029>
128. Tsunazawa, Y., Wang, T., Torige, K., & Tokoro, C. (2011). DEM simulation for specific gravity separation of plastic particles using Air-Table. *ASME-JSME-KSME 2011 Joint Fluids Engineering Conference: Volume 1, Symposia – Parts a, B, C, and D*, 4013–4016. <https://doi.org/10.1115/ajk2011-35010>
129. *Ukraine Agricultural Production and Trade*. (2022, July 22). USDA Foreign Agricultural Service. Retrieved November 28, 2022, from <https://www.fas.usda.gov/newsroom/ukraine-agricultural-production-and-trade>
130. United States Patent No. 4290560A. (1981). *Machine for making pure peanut butter*. Retrieved from <https://patents.google.com/patent/US4290560A/en>
131. United States Patent No. 8,955,779. (2015). *Method and apparatus for rubber grinding and reclaiming*. U.S. Patent and Trademark Office. Retrieved from <https://patents.google.com/patent/US8955779B2/en>
132. UP Studio. (n.d.). *Дискові дробарки| Plinfa*. Retrieved August 9, 2023, from <https://plinfa.com/ua/category/disc-crushers>
133. Vaculík, P., Maloun, J., Chládek, L., & Přikryl, M. (2013). Disintegration process in disc crushers. *Research in Agricultural Engineering*, 59(3), 98–104. <https://doi.org/10.17221/28/2012-rae>
134. Valente, D. T., Junior, Genova, J. L., Kim, S. W., Saraiva, A., & Rocha, G. C. (2024). Carbohydrases and Phytase in Poultry and Pig Nutrition: A Review beyond the Nutrients and Energy Matrix. *Animals*, 14(2), 226. <https://doi.org/10.3390/ani14020226>
135. Van Der Lee, H. (2020, December 18). *Ukraine's feed industry – renewing facilities and processes*. All About Feed. Retrieved February 20, 2022, from <https://www.allaboutfeed.net/animal-feed/feed-processing/ukraines-feed-industry-renewing-facilities-and-processes/>
136. Vorotnikov, V. (2020, December 18). *Ukraine slightly increases feed production*. All About Feed. Retrieved February 20, 2022, from

<https://www.allaboutfeed.net/animal-feed/feed-processing/ukraine-slightly-increases-feed-production/>

137. 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.2017.06.016>

138. Vukmirovic, D., Levic, J., Fistes, A., Colovic, R., Brlek, T., Colovic, D., & Djuragic, O. (2015). Influence of grinding method and grinding intensity of corn on mill energy consumption and pellet quality. *Hemijska Industrija*, 70(1), 67–72. <https://doi.org/10.2298/hemind141114012v>

139. Wang, L., Zhou, W., Ding, Z., Li, X., & Zhang, C. (2015). Experimental determination of parameter effects on the coefficient of restitution of differently shaped maize in three-dimensions. *Powder Technology*, 284, 187–194. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2015.06.042>

140. Wang, X., Wu, W., & Jia, H. (2023). Calibration of discrete element parameters for simulating wheat crushing. *Food Science & Nutrition*, 11(12), 7751–7764. <https://doi.org/10.1002/fsn3.3693>

141. Wiącek, J., Molenda, M., Horabik, J., & Ooi, J. Y. (2012). Influence of grain shape and intergranular friction on material behavior in uniaxial compression: Experimental and DEM modeling. *Powder Technology*, 217, 435–442. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2011.10.060>

142. Ye, C., Takaya, Y., Tsunazawa, Y., Mochidzuki, K., & Tokoro, C. (2022). Influence of agitator shape on characteristics and grinding efficiency of attritor mill. *International Journal of Automation Technology*, 16(6), 756–765. <https://doi.org/10.20965/ijat.2022.p0756>

143. Zewdu, A., & Solomon, W. (2006). Moisture-Dependent physical properties of TEF seed. *Biosystems Engineering*, 96(1), 57–63. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2006.09.008>

144. Zhang, C., Chen, Y., Wang, Y., & Bai, Q. (2024). Discrete element method simulation of granular materials considering particle breakage in geotechnical and mining

engineering: A short review. *Deleted Journal*, 1(2), 190–207.
<https://doi.org/10.1016/j.gsme.2024.06.003>

145. Zhao, Z., Wu, M., & Jiang, X. (2024). A review of contact models' properties for discrete element simulation in agricultural engineering. *Agriculture*, 14(2), 238.
<https://doi.org/10.3390/agriculture14020238>

146. Zhong, J., Tao, L., Li, S., Zhang, B., Wang, J., & He, Y. (2022). Determination and interpretation of parameters of double-bud sugarcane model based on discrete element. *Computers and Electronics in Agriculture*, 203, 107428.
<https://doi.org/10.1016/j.compag.2022.107428>

147. Zhou, Y., Zhu, Y., & Wong, W. K. (2023). Statistical tests for homogeneity of variance for clinical trials and recommendations. *Contemporary clinical trials communications*, 33, 101119. <https://doi.org/10.1016/j.conctc.2023.101119>

148. Zinn, R. A. (2000). *A guide to feed mixing*. University of California, Davis. Retrieved from <http://animalscience.ucdavis.edu/faculty/zinn/pdf/04.pdf>

149. АгроВектор. (n.d.). *Дробилка валкова 450×350 мм, 3 кВт*. Retrieved February 2, 2022, from https://agrovektor.com/ua/physical_product/1451759-drobilka-valkovaya-450350-mm-3-kvt.html

150. АгроВектор. (n.d.). *Комплекс приготування комбікорму КК-2 Доза*. Retrieved from https://agrovektor.com/ua/physical_product/60257-kompleks-prigotovleniya-kombikorma-kk-5-doza.html

151. Алієв, Е. Б. (2023). *Чисельне моделювання процесів агропромислового виробництва: Підручник* (340 с.). Київ: Аграрна наука. <https://doi.org/10.31073/978-966-540-584-9>

152. *Аналіз ринку комбікормів в Україні. 2023 рік*. (2025). <https://proconsulting.ua/ua/issledovanie-rynka/analiz-rynka-kombikormov-v-ukraine-2023-god>

153. Білецький, В. С., Олійник, Т. А., Смирнов, В. О., & Скляр, Л. В. (2019). *Техніка та технологія збагачення корисних копалин: Ч. 1: Підготовчі процеси* (199 с.). Чернявський Д. О. ISBN 978-617-7553-73-0.

154. Білоус, І. М. (2022). Обґрунтування доцільності підвищення ефективності подрібнення концентрованих кормів. *Матеріали XXI Міжнародної науково-технічної*

конференції «Технічний прогрес у тваринництві та кормовиробництві» (с. 9–11). ІМА АПВ НААН України. <https://imaap.org.ua/info/attach.php?id=817>

155. Білоус, І. М. (2025). Класифікація дискових подрібнювачів. *Збірник тез доповідей Міжнародної науково-практичної конференції «Інновації в агропромисловому комплексі, машинобудуванні та транспорті» (9–10 квітня 2025 р., Рівне)* (с. 8–10). НУВГП.

156. Вербич, І. В., & Братковська, Г. В. (2020). Використання у годівлі молодняка свиней комбікорму з різними способами переробки сої із соняшnikовою макухою. *Корми і кормовиробництво*, (89), 205–212. <https://doi.org/10.31073/kormovyrobnytstvo202089-20>

157. Волощук, В. М., та Семенов, С. О. (2016). Комбікорми-потенціал інноваційних реформ. *Свинарство: міжвідомчий тематичний науковий збірник*, (68), 86-92.

158. Волчко, А. І., Павлов, С. О., Волчко, А. А., & Дороніна, К. М. (2012). *Дисковий млин*. (Патент України №98588).

159. Горват, А. А., Молнар, О. О., & Мінкович, В. В. (2019). *Методи обробки експериментальних даних з використанням MS Excel: Навчальний посібник*. Видавництво УжНУ “Говерла”.

160. Грипинич, К. В., Дудко, С. Д., Масло, М. А., & Сухенко, Ю. Г. (1996). *Дискований млин*. (Патент України № 10721).

161. Гуцол, А. В., Дмитрук, І. В., & Дмитрук, Л. І. (2023). Продуктивність молодняка свиней при використанні пробіотичних препаратів у складі гранульованих комбікормів. *Корми і кормовиробництво*, (96), 172-179. <https://doi.org/10.31073/kormovyrobnytstvo202396-16>

162. Державна служба статистики України. (n.d.). *Офіційний сайт*. Retrieved from <https://www.ukrstat.gov.ua>

163. *Десять років африканської чуми свиней у ЄС: як розвивалася хвороба?* (2025, January 30). PigUA.Info. Retrieved February 5, 2025, from <https://www.pigua.info/uk/post/news-of-ukraine-and-world/desat-rokiv-afrikanskoi-cumi-svinej-u-es-ak-rozvivalasa-hvoroba>

164. ДСТУ 3768:2019. (2019). *Пшениця. Технічні умови* [Чинний від 10.06.2019 р.]. Київ: Державне підприємство «УкрНДНЦ».
165. ДСТУ 3769-98. (1998). *Ячмінь. Технічні умови. З Поправкою (ІПС № 6-99)* [Чинний від 01.07.1998 р.]. Київ: Державне підприємство «УкрНДНЦ».
166. ДСТУ 4397:2005 (2015). *Сільськогосподарська техніка. Методи економічного оцінювання техніки на етапі випробування*. [Чинний від 01.01.2006 р.]. Київ: Державне підприємство «УкрНДНЦ».
167. ДСТУ 4525:2006. (2006). *Кукурудза. Технічні умови* [Чинний від 01.04.2007 р.]. Київ: Державне підприємство «УкрНДНЦ».
168. ДСТУ 7693:2015. (2015). *Комбікормова сировина. Загальні технічні умови* [Чинний від 01.08.2016 р.]. Київ: Державне підприємство «УкрНДНЦ».
169. ДСТУ 7693:2015. (2015). *Комбікормова сировина. Загальні технічні умови* [Національний стандарт України; чинний від 01.08.2016]. Київ: УкрНДНЦ.
170. ДСТУ ISO 712:2015 (2016) *Зернові та продукти з них. Визначення вмісту вологи. Контрольний метод (ISO 712:2009, IDT)* [Чинний від 01.01.2016 р.]. Київ: Державне підприємство «УкрНДНЦ».
171. Дудін, В. & Білоус, І. (2025). Заявка на патент України на корисну модель u202501193. Подрібнювач концентрованих кормів. Заявник: Дудін В., Білоус І., Заявл. 20.03.2025. <https://sis.nipo.gov.ua/uk/search/detail/1847229/>
172. Дудін В. Ю., & Білоус І. М. (2025) Дослідження ефективності роботи дискового подрібнювача зерна. *Вібрації в техніці та технологіях*. 2025. № 1(116). С. 56–63. <http://doi.org/10.37128/2306-8744-2025-1-7>
173. Дудін, В. Ю., & Білоус, І. М. (2023). Експериментальні дослідження дискового подрібнювача зерна. *Техніка, енергетика, транспорт АПК*, 4(123), 71–77. <http://dx.doi.org/10.37128/2520-6168-2023-4-8>
174. Дудін, В. Ю., & Білоус, І. М. (2023). Стенд для проведення експериментальних досліджень дискового подрібнювача зерна. *Матеріали VI Всеукраїнської науково-практичної інтернет-конференції «Проблеми та перспективи розвитку сільськогосподарського машинобудування»* (с. 54–56). ПДАУ.

175. Дудін, В. Ю., & Білоус, І. М. (2024). Дослідження міцності зерна кукурудзи з використанням чисельного моделювання методом дискретних елементів (DEM). *Збірник тез доповідей XXV Міжнародної наукової конференції «Сучасні проблеми землеробської механіки»* (с. 191–193). МОН України; НУБіП України. https://nubip.edu.ua/sites/default/files/u349/zbirnik_tez_1.pdf
176. Дудін, В. Ю., & Білоус, І. М. (2024). Дослідження процесу руйнування зерна кукурудзи з використанням цифрових моделей. *Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки*, 10(41), II, 123–130. [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2024.10\(41\).2.123-130](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2024.10(41).2.123-130)
177. Дудін, В. Ю., & Білоус, І. М. (2024). Лабораторне обладнання для дослідження процесу визначення зусилля руйнування та деформації зерна. *Інжиніринг технологій і технічних систем агропромислового комплексу: Збірник тез III Всеукраїнської науково-практичної конференції молодих вчених* (Vol. 1, pp. 170–172). Дніпро, Україна: ДДАЕУ. [https://133phd.dsau.dp.ua/images/doc/conference/2024/Theses_DDAEU\(2024\)_1.pdf](https://133phd.dsau.dp.ua/images/doc/conference/2024/Theses_DDAEU(2024)_1.pdf)
178. Дяченко, Л. С., Бомко, В. С., & Сивик, Т. Л. (2015). *Основи технології комбікормового виробництва: Навчальний посібник*. Біла Церква. <http://rep.btsau.edu.ua/handle/BNAU/1730>.
179. Єремєєв, В., Прокоф'єв, Є., Наумук, О., & Брянцев, О. (2019). Програмне забезпечення для оптимізації процесу методом Бокса-Бенкіна у разі трифакторного експерименту з декількома вихідними параметрами. *Праці Таврійського державного агротехнологічного університету імені Дмитра Моторного*, 19(3), 295-307. <https://doi.org/10.31388/2078-0877-19-3-295-307>
180. Завгородній, О. І., Левкін, Д. А., Котко, Я. М., & Левкін, А. В. (2021). Економіко-математичне моделювання прогнозування ймовірних ризиків технологічних процесів. *Вчені записки Таврійського національного університету імені В. І. Вернадського. Серія: Технічні науки*, 32(71), 4, 66–70. <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2021.4/10>
181. *Каталог продукції ХМЗ*. (n.d.). Retrieved November 27, 2023, from <https://mezhavod.com.ua/ua/catalog/ustanovki-mini-kombikormovye/?from=743>

182. Кисельов, О. В., Комарова, І. Б., Мілько, Д. О., Бакарджієв Р. О. (2017). Статистична обробка і оформлення результатів експериментальних досліджень (із досвіду написання дисертаційних робіт): Навчальний посібник. Запоріжжя: СТАТУС.
183. *Лінія виробництва комбікормів продуктивністю 3 т/год.* (n.d.). Retrieved January 15, 2022, from <https://neuro-ukraina.com.ua/goods/liniya-virobnitstva-kombikormiv-produktivnistyu-3-tgod/>
184. *Лінія з пневмодробилкою з забиранням із бункера продуктивністю до 1,5 т/год.* (n.d.). <https://neuro-ukraina.com.ua/goods/liniya-z-pnevmodrobilkoyu-z-zabirannyam-iz-bunkera-produktivnistyu-do-15-tgod/>
185. *Лінія приготування кормів продуктивністю до 3 т/год.* (n.d.). simo.com.ua. Retrieved January 15, 2022, from <https://simo.com.ua/ua/obladnannya/modulnij-komb%D1%96kormovij-zavod-lpk-3>
186. *МКУ-0,7. Каталог продукції ХМЗ.* (n.d.). mehzavod.com.ua. Retrieved November 27, 2023, from <https://mezhavod.com.ua/ua/catalog/ustanovki-mini-kombikormovye/mku-0-7/>
187. *МКУ-3,0. Каталог продукції ХМЗ.* (n.d.). mehzavod.com.ua. Retrieved November 27, 2023, from <https://mezhavod.com.ua/ua/catalog/ustanovki-mini-kombikormovye/mku-3-0/>
188. Названо ТОП-10 українських виробників комбікормів. (2020, July 7). *Latifundist.com*. <https://latifundist.com/novosti/50904-nazvany-top-10-ukrainskih-proizvoditelej-kombikorma>
189. *Небезпека африканської чуми свиней.* (2012, May 18). Агробізнес Сьогодні. Retrieved February 20, 2022, from <https://agro-business.com.ua/agro/suchasne-tvarynnystvo/item/8038-nebezpeka-afrykanskoi-chumy-svynei.html>
190. Осокіна, Н. М., Костецька, К. В., & Герасимчук, О. П. (2023). Physical and mechanical properties and quality indicators of grain of cereal cultures. *Збірник наукових праць Уманського НУС*, 103(1), 292–307. <http://dx.doi.org/10.32782/2415-8240-2023-103-1-292-307>

191. *Ручні жорна в господарстві українців | Етнографія.* (n.d.). Retrieved January 29, 2022, from <https://ethnography.org.ua/content/ruchni-zhorna-v-gospodarstvi-ukrayinciv>
192. Сердюк, В. В. (2016). До питання визначення модуля помелу зерна подрібнювачів ударної дії. In *Інтеграційна система освіти, науки і виробництва в сучасному інформаційному просторі: матеріали III Міжнародної науково-практичної конференції* (pp. 65–66). Крок.
193. Сфера Вагів. (n.d.). *Ваги Лабораторні Електронні Центровес JD-2000-2.* Retrieved April 12, 2023, from https://sphaera-vesov.com.ua/ua/p1434670839-vesy-laboratornye-elektronnye.html?srsltid=AfmBOoqTl_Soadju2LgkKDPoleauFntnUH3sUxQzrTQ0BBn9MFyEjBQV.
194. Темненко, С. М., Шиян, В. В., & Марченков, Д. Ф. (2024). Формування пропозиції на вітчизняному ринку комбікормів та вплив воєнних дій на функціонування галузі кормовиробництва. *Науково-технічний вісник ДНДІ ветеринарних препаратів та кормових добавок і Інституту біології тварин*, 25(1), 203-211. <https://doi.org/10.36359/scivp.2024-25-1.26>
195. Тетяна Ковальчук. (n.d.). Власне виробництво комбікормів — це запорука незалежності в агробізнесі. <https://www.agronomy.com.ua/statti/29-kormovyrobnytstvo/2987-vlasne-vyrobnytstvo-kombikormiv-tse-zaporuka-nezalezhnosti-v-ahrobiznesi.html>
196. Ткаченко, І. В., & Алієв, Н. А. (2004). *Дискований млин* (Патент України № 71127).
197. ТОВ «ХІМЛАБОРРЕАКТИВ». (n.d.). *Розсів лабораторний РЛУ-3к (одногніздний на 5 см+К+П) X0317558.* Retrieved April 16, 2023, from <https://shop.hlr.ua/ua/rassev-laboratornyy-rlu-3k-odnognezdnyy-na-5-sitkp-263488.html>
198. ТОВ Лабімпекс ЛТД. (n.d.). *Розсійник лабораторний РЛУ-3 – Лабімпекс ЛТД.* Retrieved April 16, 2023, from <https://labimpex.com.ua/ua/p45520992-rassev-laboratornyj->

rlu.html?srsltid=AfmBOormHWSTQTDZgtx0frIW9Xym4xxQxeB3vC1usceQuR-aOvp1PVgN

199. УПК-2,4. *Каталог продукції ХМЗ*. (n.d.). mhzavod.com.ua. Retrieved November 27, 2023, from <https://mehzavod.com.ua/ua/catalog/ustanovki-mini-kombikormovye/upk-2-4/>

200. Центровес Сервіс. (n.d.). *Ваги Лабораторні JD-2200-2*. Retrieved April 12, 2023, from <https://centroves.com.ua/vagy-laboratorni-jd-2200-2>.

201. Шкельов, Л. Т., Станкевич, А. М., & Пошивач, Д. В. (2011). *Опір матеріалів: Підручник для студентів вищих навчальних закладів*. ЗАТ «мВіпол».

Додаток А. Патентний пошук

На першому етапі технологічного ланцюжка ключову роль відіграє операція дозування компонентів, що полягає у точному зважуванні кожного інгредієнта згідно з рецептурою та в межах встановлених допусків. Відхилення на цьому етапі прямо позначається на збалансованості суміші [32]. Подальшу рівномірність розподілу поживних речовин забезпечує процес змішування, у якому оцінюють однорідність за допомогою коефіцієнта варіації вмісту маркерних компонентів. Недостатня однорідність може призводити до нерівномірного надходження поживних речовин у раціоні тварин та зниження їх продуктивності.

У свинарстві використання повнораціонних комбікормів є стандартом годівлі, що забезпечує високу продуктивність і швидке зростання поголів'я. Свині – моногастричні тварини, тому для них особливо важливо збалансувати раціон за енергією, протеїном та амінокислотами. Зернові культури (кукурудза, пшениця, ячмінь тощо) забезпечують енергію, але часто дефіцитними є протеїн і такі незамінні амінокислоти, як лізин [156]. За даними досліджень, типовий дефіцит перетравного протеїну в раціонах свиней без належних добавок може сягати близько 40% [156]. Тому до складу комбікормів для свиней обов'язково вводять багаті на протеїн інгредієнти – шроти олійних (або соєвий шрот), горох, продукти переробки риби чи м'яса, а також синтетичні амінокислоти для компенсації нестачі лізину і метіоніну. Такий підхід дозволяє забезпечити оптимальний вміст сирого протеїну та збалансований амінокислотний профіль корму, що стимулює інтенсивний ріст свиней і формування м'язової тканини [156]. Практика показує, що використання якісних комбікормів у годівлі свиней значно підвищує показники продуктивності. Зокрема, середньодобовий приріст молодняку на відгодівлі при годуванні збалансованим комбікормом може становити 600–900 г на добу (залежно від періоду відгодівлі), тоді як за традиційної годівлі – помітно менше [156].

Таким чином, завдяки повнораціонним комбікормам свині швидше досягають забійних кондицій при меншій витраті кормів на одиницю приросту. Окрім основних компонентів (зернові та шроти), до складу комбікормів для свиней зазвичай

включають премікси вітамінів і мінералів, а також функціональні добавки (ферменти, пробіотики, кислоти). Наприклад, додавання пробіотичних препаратів до комбікорму для відгодівлі поросят здатне підвищувати їх середньодобовий приріст – в одному досліді він був на 115 г більшим у групі з пробіотиком порівняно з контролем на 150-й день вирощування [161]. Водночас комбікорми промислового виготовлення проходять термічну обробку та гранулювання, що підвищує гігієнічну якість корму і його поїдання. Гранульовані комбікорми забезпечують рівномірне споживання всіх інгредієнтів без вибіркового поїдання; кожна гранула містить повний комплекс поживних речовин, а повільніше розчинення гранул сприяє кращому засвоєнню нутрієнтів. Це позитивно впливає на здоров'я травної системи свиней і зменшує непродуктивні втрати корму.

Використання комбікормів у свиначстві також пов'язане з оптимізацією годівлі на різних стадіях виробництва – від стартерних кормів для поросят до фінішних для відгодівлі та спеціалізованих раціонів для свиноматок. Сучасні підходи передбачають концепцію прецизійної годівлі, коли склад комбікорму максимально точно відповідає потребам тварин залежно від їх віку, ваги, фізіологічного стану.

Комбікорми є основою для забезпечення птиці необхідними поживними речовинами, такими як білки, вуглеводи, жири, мінерали та вітаміни. Вони допомагають покращити швидкість зростання, яйцекладність та загальний стан здоров'я, що є критично важливим для птахівництва.

Дослідження свідчать, що комбікорми покращують темпи зростання, коефіцієнт конверсії корму та яйцекладність. Наприклад, дослідження Raza та ін. (2019) підкреслили, що додавання ферментів до комбікормів покращує перетравність поживних речовин та зростання бройлерів [101]. Крім того, вони відіграють ключову роль у профілактиці захворювань, забезпечуючи збалансоване споживання всіх необхідних поживних речовин, що допомагає підтримувати здоров'я та бадьорість птиці, тим самим знижуючи чутливість до хвороб [28].

У птахівництві переважно використовують гранульовані комбікорми, які покращують поїдання і перетравність корму. Гранули містять повний набір інгредієнтів і не дають можливості птиці вибирати лише окремі компоненти корму.

Ще одна перевага – зменшення втрат корму, оскільки дрібна розсипна фракція не розкидається і не затоптується птахами, на відміну від борошнистих кормів.

У вирощуванні великої рогатої худоби (ВРХ) підхід до годівлі відрізняється через особливості травлення жуйних тварин. Раціони ВРХ містять значну частку об'ємистих кормів – пасовищної трави, сіна, силосу, – але комбікорми відіграють ключову роль як концентровані добавки, що забезпечують високопродуктивну худобу необхідною енергією і протеїном. Для молочної худоби найбільш ефективною є система *total mixed ration* (TMR), коли всі компоненти – силос, сінаж, комбікорми, премікси – змішуються в однорідну масу. Такий підхід гарантує, що кожна порція корму для корови збалансована за всіма поживними елементами, й тварина не може вибірково поїдати лише смачні концентрати, відкидаючи грубі корми. Перехід від роздільної годівлі до повністю змішаного раціону здатен додатково забезпечити приріст продуктивності дійного стада за рахунок кращого перетравлення та вищого споживання корму [23].

Тому роль комбікормів у скотарстві полягає в доповненні раціонів тими компонентами, яких бракує в об'ємистих кормах (енергія концентратів, протеїн шротів, мінерали), а також у прискоренні відгодівлі. Збалансовані комбікормові добавки для корів (такі як білково-вітамінно-мінеральні концентрати) підвищують вміст протеїну в загальному раціоні, що особливо важливо при годівлі силосом і сінажем із дефіцитом сирого протеїну. За недостатнього рівня протеїну у грубих кормах продуктивність худоби різко знижується – ця проблема добре відома в багатьох господарствах [157]. Таким чином, комбікорми для великої рогатої худоби – це насамперед спосіб збалансувати раціон і досягти високих продуктивних показників (надоїв або приростів) без ризику виснаження тварин.

Таким чином можна підсумувати, що якість комбікормів (поживна цінність, безпечність, фізико-хімічні показники) напряду визначає продуктивність і здоров'я тварин. Високий вміст перетравного протеїну та збалансовані амінокислоти забезпечують оптимальні прирости чи надої, безпека від мікотоксинів і патогенів корелює з рівнем захворюваності й репродуктивними показниками.

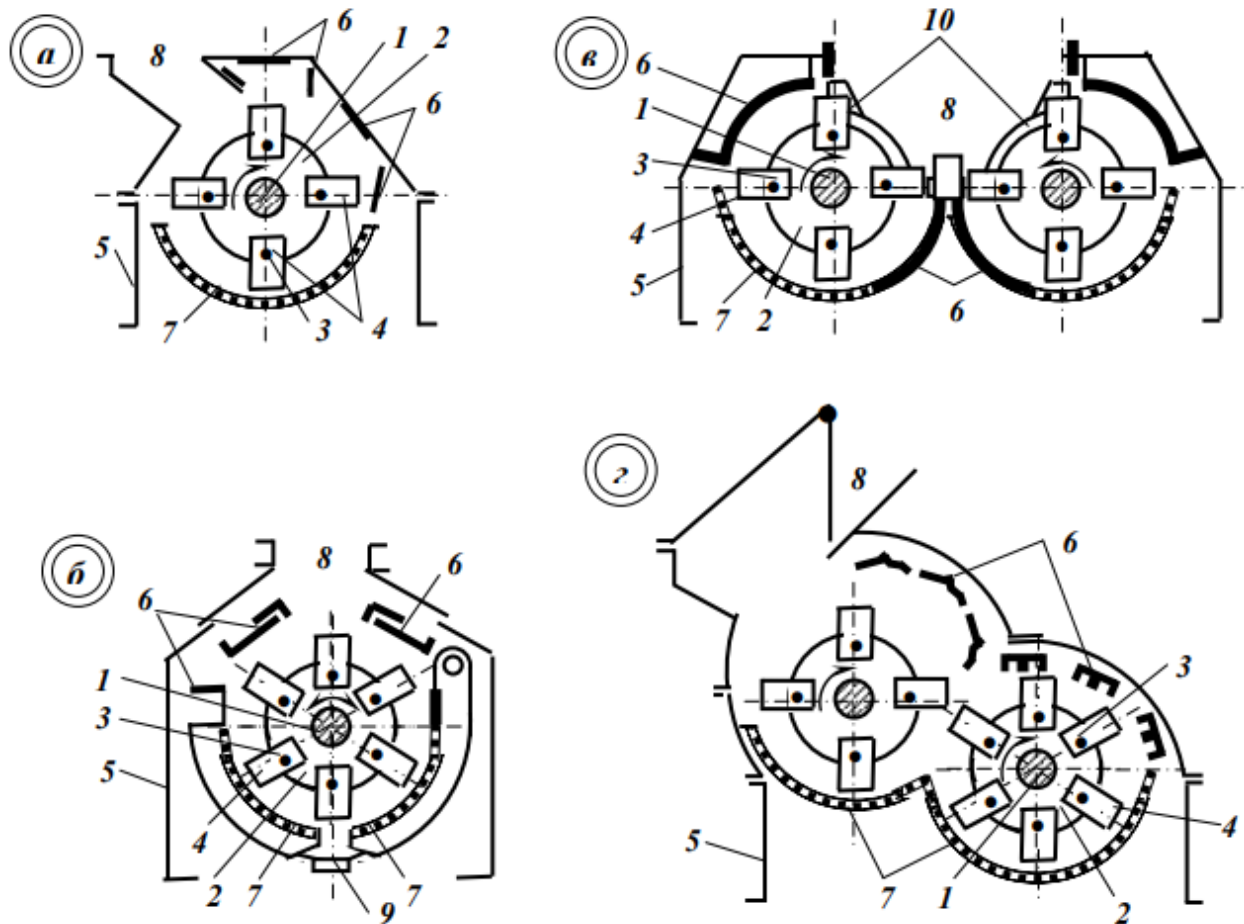
Економічний ефект якісного комбікорму проявляється в кращому FCR, зниженні витрат на ветеринарне обслуговування. Екологічні переваги високоякісних комбікормів пов'язані зі зменшенням викидів азоту, фосфору та скороченням загального обсягу спожитої сировини.

Молоткові дробарки (рис. А.1) є одним із найпоширеніших типів подрібнювального обладнання, яке використовується для подрібнення різноманітних матеріалів за рахунок ударної дії молотків, встановлених на роторі. Залежно від конструкції ротора молоткові дробарки поділяються на однороторні і двороторні. Однороторні дробарки можуть бути нереверсивними, де ротор обертається тільки в одному напрямку, та реверсивними, у яких можливе обертання ротора в обох напрямках. Двороторні молоткові дробарки поділяються на дробарки паралельного дроблення, де два ротори працюють одночасно, розташовуючись паралельно, та дробарки послідовного дроблення, в яких подрібнення матеріалу відбувається послідовно на двох роторах. Основні складові молоткових дробарок включають горизонтальний вал, ротор, осі молотків, молотки, корпус, футерувальні плити, колосникову решітку, завантажувальну лійку, уловлюючу камеру та фігурні колосники, що забезпечують ефективність і надійність роботи обладнання.

Валкові дробарки, схема яких наведена на рисунку А.2, призначені для подрібнення матеріалу шляхом роздавлювання між двома валками, які обертаються з певною швидкістю. Така конструкція дозволяє отримувати більш рівномірний розмір частинок і використовується для подрібнення матеріалів із заданою міцністю.

Таким чином, розглянуті схеми і конструктивні особливості молоткових і валкових дробарок є базовими для розуміння їх роботи та вибору оптимального типу обладнання для конкретних виробничих задач.

Сучасні конструкції зернових дискових млинів пройшли тривалий шлях розвитку і відзначаються відносно тихою роботою та зниженим пиловиділенням [133].



Однороторні: а – нереверсивна; б – реверсивна. Двуроторні: в – паралельного дроблення; г – послідовного дроблення. 1 – горизонтальний вал; 2 – ротор; 3 – осі молотків; 4 – молотки; 5 – корпус дробарки; 6 – футерувальні плити; 7 – колосникова решітка; 8 – завантажувальна лійка; 9 – уловлююча камера; 10 – фігурні колосники

Рисунок А.1 – Схеми основних типів молоткових дробарок [153]

Наприклад, дисковий млин з логарифмічними канавками захищений патентом України №98588 (2012) (рис. А.3) було розроблено в Національному університеті харчових технологій (Україна) для підвищення якості подрібнення зерна. На робочих поверхнях верхнього рухомого і нижнього нерухомого дисків виконані дугоподібні канавки профілем за законом логарифмічної спіралі. Канавки напрямлені назустріч одна одній [158]. Така геометрія забезпечує поступове зменшення ширини канавки від центру до периферії та постійний кут перетину зернини з ріжучою кромкою по всьому

радіусу. Це дозволяє інтенсивніше подрібнювати зерно і одержувати більш тонкий та однорідний помел і підвищення продуктивності на $\sim 20\%$ порівняно зі стандартними радіальними канавками (за даними опису патенту) [158]. Додатково заявлено можливість використання цього млина для луцення кукурудзи, гречки, проса та інших культур [158].

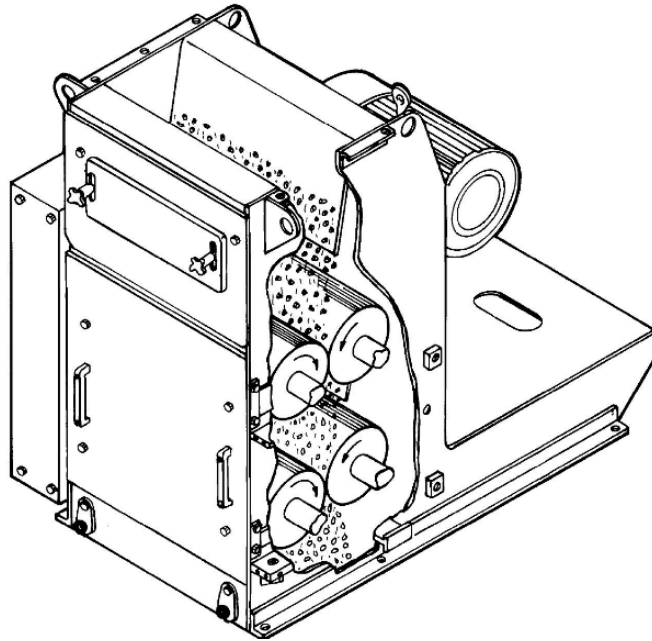


Рисунок А.2 – Схема валкової дробарки [8]

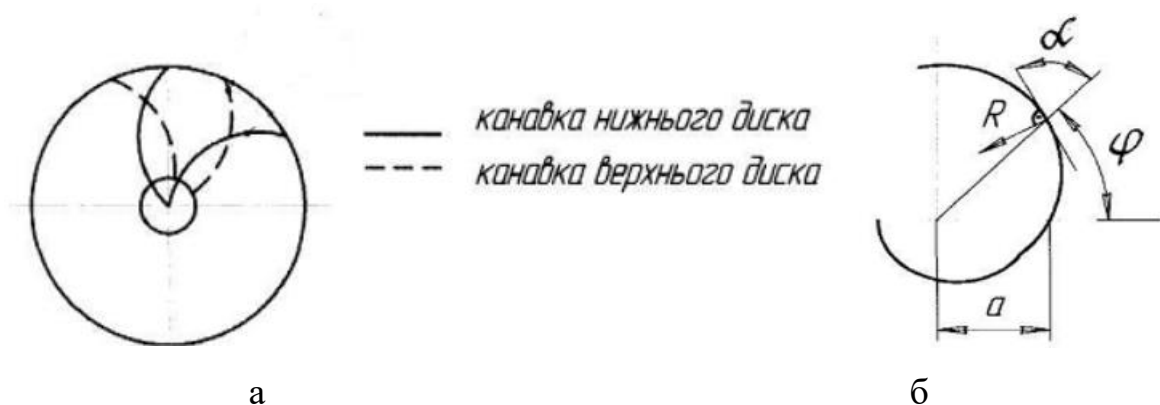


Рисунок А.3 – Логарифмічні спіральні канавки на дисках: а) взаємне розташування канавок нижнього і верхнього дисків; б) параметри логарифмічної спіралі [158]

Прикладом харчової дискової дробарки є колоїдний млин для пастоподібних продуктів (арахісова паста, кунжутна тахіні, фруктові пюре) (патент Сполучених Штатів Америки №4290560А). Тут пара дисків (або диск і нерухомий стакан) працюють з мінімальним проміжком, іноді з різними рельєфними насічками, і обертаються з високою швидкістю, перетираючи продукт до пасти [130]. Класична машина для виготовлення арахісового масла містить один нерухомий і один обертовий диск з радіальними ребрами-зачепами; арахіс подається шнеком у центр, роздрібнюється між дисками з зубцями і виходить у вигляді однорідної пасти. У цій конструкції диски (рис. А.4) спеціально спроектовані так, щоб перемелене «масло» відганялося від периферії назад до центру і вивантажувалося вниз, не проходячи повторно між зубцями [130].

До національних розробок слід віднести й корисні моделі на удосконалення зернових дробарок. В патенті України №10721 (1996) пристрій (рис. А.5) призначений для подрібнення сипких матеріалів в т.ч. зернових культур і може використовуватися в сільському господарстві та в переробних галузях для виробництва борошна.

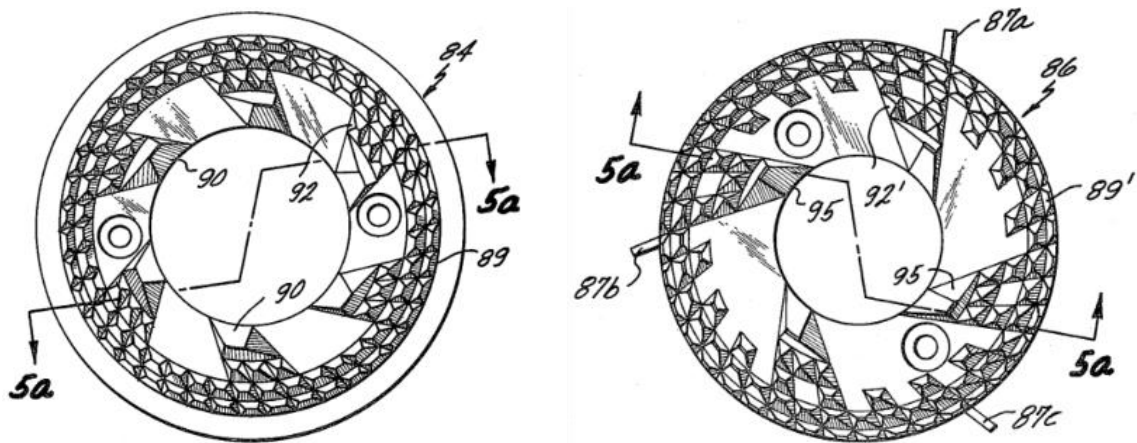


Рисунок А.4 – Конструкції дисків колоїдного млина [130]

Дисковий млин має покращений механізм для регулювання робочого зазору в залежності від однорідності вихідної сировини та автоматичного наближення та віддалення дисків в залежності від режиму подачі сировини. Це дозволяє уникнути

можливого контакту між робочими поверхнями дисків і не потребує попередньої ретельної очистки вихідної сировини від твердих частинок [160].

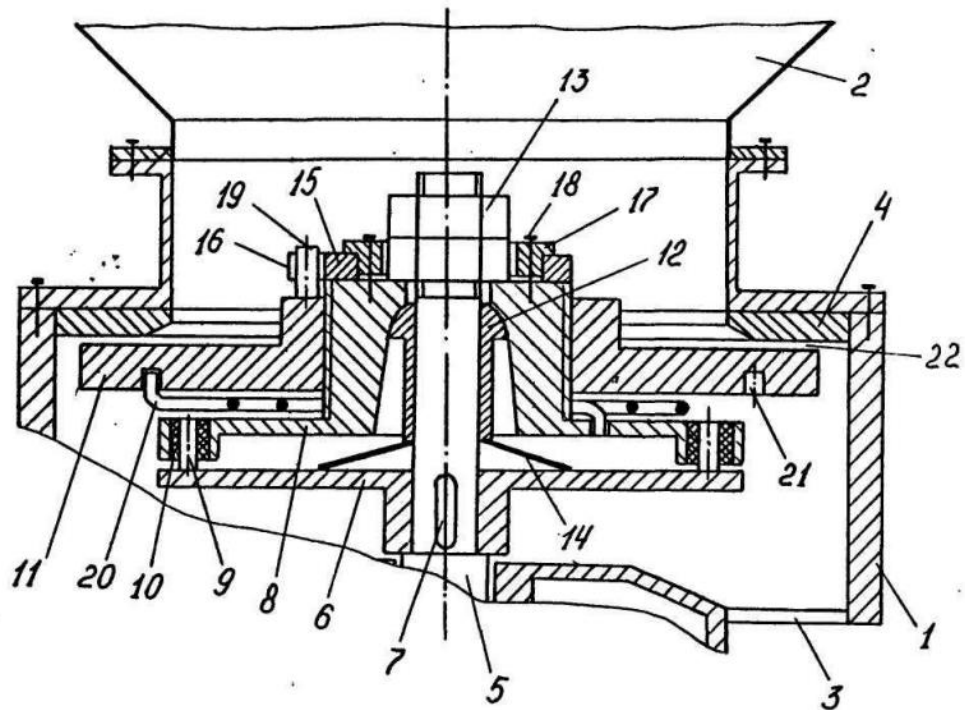


Рисунок А.5 – Дісковий млин з вертикальним розташуванням валу [160]

В патенті України №71127А (2004) йдеться про винахід, який є обладнанням для розмелювання, яке може використовуватися для подрібнення різних матеріалів, включаючи вугілля, кам'яну сіль, наповнювачі для полімерних композитів, мінеральні добрива, а також сільськогосподарські зернові і зернобобові культури розмір частинок яких може бути від 10–12 мм до 1 мм, отримуючи різні типи борошна та крупи з різним ступенем дисперсності. Мета цього винаходу – підвищити продуктивність і якість розмелу продукту в дисковому млині. Це досягається шляхом використання двох конічних аксоїдних жорен, які мають спеціально розроблені ножі. Ножі на рухомому жорні нахилені в одному напрямку, а на нерухомому – в протилежному напрямку. Поверхні цих жорен (рис. А.6) мають тангенціальні канавки, і кожна з них розділена на підзони з косою рифленою насічкою, кут якої відповідає куту нахилу ножів. Це дозволяє підвищити ефективність розмелу і отримати більш однорідний продукт [196].

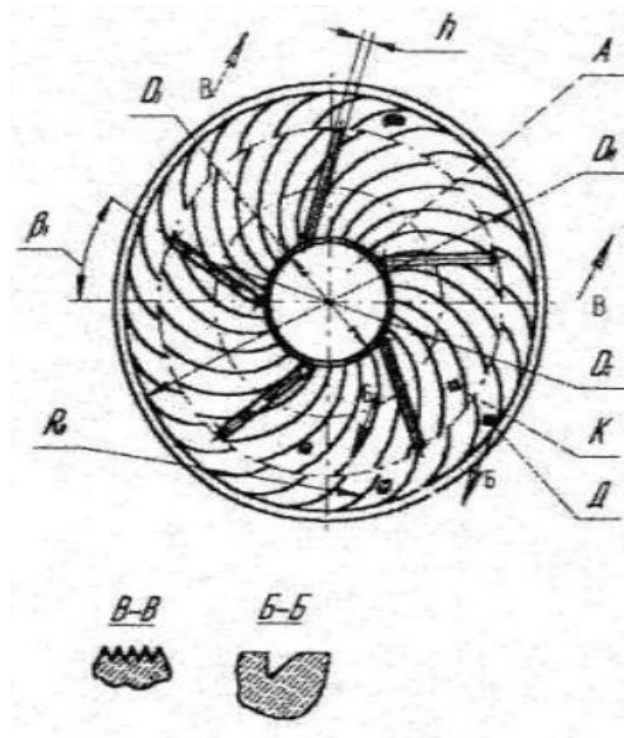


Рисунок А.6 – Вид поверхні жорна [196]

Цікаве рішення запропоновано для дискових зернових млинів у патенті US20070181723A1 (США, 2007). У традиційних дробарках зерно здебільшого подрібнюється в самому вузькому кільцевому проміжку на периферії, де диски майже торкаються – тому час перебування частки в цій зоні дуже малий. Відтак, важко досягти високої однорідності подрібнення за один прохід – або треба повторно пропускати матеріал, або зменшувати подачу і оберти, що знижує продуктивність. У згаданому патенті запропоновано дворежимні диски: у внутрішній області біля центру вони утворюють клиновидний (конусний) проміжок, що звужується до периферії, а в зовнішній області – мають ділянку, паралельну протилежному диску, утворюючи майже циліндричний зазор (рис. А.7 а). На внутрішній конусній частині дисків зроблені прямі ріжучі зубці пілкоподібної форми (рис. А.7 б), які поступово подрібнюють зерно при його русі назовні; на зовнішній паралельній частині теж є зубці, але меншого профілю і під гострішим кутом до радіуса. Завдяки цьому, замість миттєвого «проскакування» через вузький кільцевий проміжок, частинки довше перебувають між дисками на периферії – фактично проходять через плоский кільцевий канал, де відбувається додаткове перетирання. Випробування показали, що

така конструкція дозволяє отримати дрібніше і однорідніше зернове борошно за один прогін без зниження подачі [48].

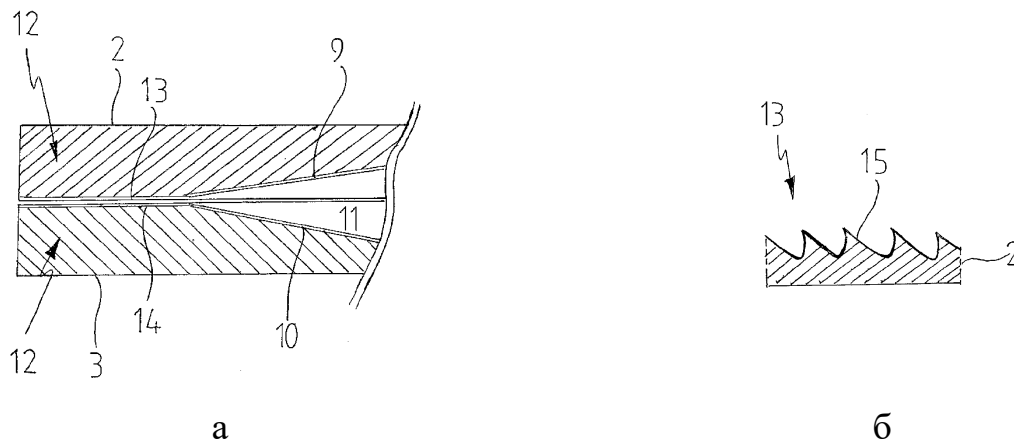


Рисунок А.7 – Поверхня дворежимного диску: а – клиновидний і циліндричний зазори; б – прямі ріжучі зубці пилкоподібної форми [48]

В сфері переробки відходів і пластмас заслуговує уваги патент US8955779B2 (2015) на спосіб і апарат для подрібнення гуми. В ньому реалізовано поєднання дискового дроблення з одночасною рекуперацією тепла і девулканізацією гуми. Конструктивно апарат складається з плоского нерухомого диска-статора і роторного диска спеціальної форми. Рухомий диск (рис. А.8) має увігнуту (конічну) робочу поверхню з гвинтовим виступом, що поступово зменшується за глибиною від центру до краю. Гумові відходи (шматки шин) подаються шнеком у центр між дисками і перетираються, просуваючись по спіралі до периферії. Подовжена спіральна траєкторія забезпечує достатній час перебування матеріалу в зоні тертя, тож гума встигає нагрітися від виділеного тепла і частково девулканізуватися. Важливо, що нагрів відбувається всередині матеріалу (за рахунок його деформації), а самі диски охолоджуються – в конструкції передбачена водяна сорочка на статорі. Це рішення дозволяє отримувати надтонку гумову крихту (порошок) і одночасно підготувати її до повторної переробки, уникаючи перегріву і горіння [131].

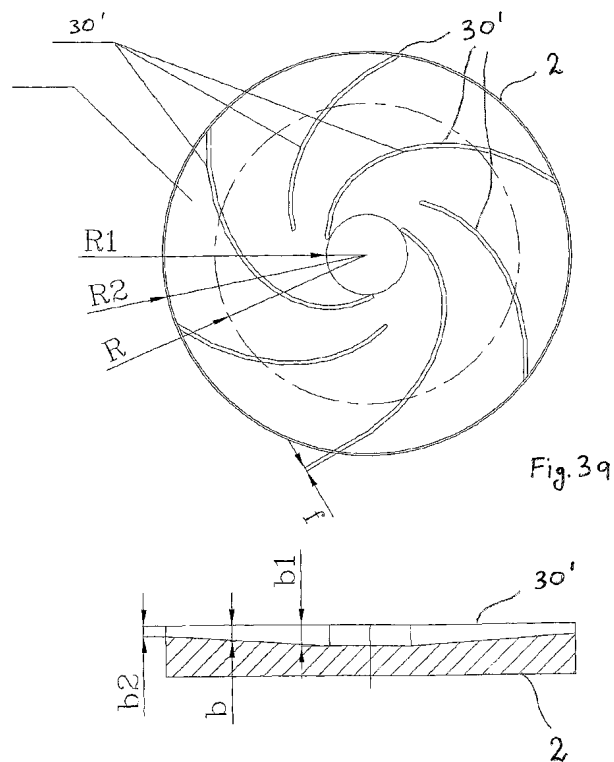


Рисунок А.8 – Рухомий диск зі спіральною поверхнею [131]

Таким чином, у дискових подрібнювачах дедалі частіше застосовують складні геометрії (логарифмічні спіралі, конічні та дворежимні зазори), що забезпечує більш тонкий, однорідний помел і підвищує продуктивність на 15–20% при зниженому рівні шуму й пиловиділення. Крім того, схеми з автоматичним регулюванням зазору й різноманітними рельєфними канавками дозволяють обробляти як зернові культури, так і інші матеріали (напр. горіхові пасти чи гуму) із максимальною ефективністю.

Додаток Б. Стан діловодства патенту

Форма В4



МІНЕКОНОМІКИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ОРГАН ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ ВЛАСНОСТІ
ДЕРЖАВНА ОРГАНІЗАЦІЯ
«УКРАЇНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ОФІС
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ ВЛАСНОСТІ ТА ІННОВАЦІЙ»
(УКРНОІВІ)

вул. Дмитра Годзенка, 1, м. Київ, 01601, тел.: +380 44 209-27-06, +380 67 501-05-95
e-mail: office@nipo.gov.ua, http://www.nipo.gov.ua, код згідно з ЄДРПОУ 44673629

25.03.2025 № 4994/ЗУ/25

Стосується заявки № 2025 01193
/ при листуванні просимо посилається на цей № /

Адреса для листування
Дніпровський державний аграрний
університет, Пугач А.М., вул. Сергія
Єфремова, 25, м. Дніпро, 49009



Повідомлення про встановлення дати подання заявки на винахід (корисну модель)

(21) Реєстраційний номер заявки **2025 01193**

(71) Заявник(и)
ДУДІН ВОЛОДИМИР ЮРІЙОВИЧ, БІЛОУС ІЛЛЯ МИХАЙЛОВИЧ

(54) Назва корисної моделі
ПОДРІБНЮВАЧ КОНЦЕНТРОВАНИХ КОРМІВ

Матеріали заявки відповідають вимогам статті 13 Закону України «Про охорону прав на винаходи і корисні моделі» (далі – Закон) щодо встановлення дати подання заявки на дату одержання Державною організацією «Український національний офіс інтелектуальної власності та інновацій»:

- матеріалів заявки

Дата подання заявки **20.03.2025**

Начальник сектору встановлення дати подання заявок

Любов ЛУЦЕНКО

Телефон 494-05-98

Провідний експерт

Тетяна ІГНАТЬЄВА

Телефон 494-05-98

u202501193

Заявка на корисну модель

Головна / Заявка № u202501193

Бібліографічні дані

Формула

Опис

Опублікований опис

Реферат (UA)

Реферат (RU)

Реферат (EN)

Стан діловодства

Сповідчення

Стан діловодства

Стадії

- Патент зареєстровано
- Підготовка до державної реєстрації та публікації
- Очікування документа про сплату державного мита
- Кваліфікаційна експертиза
- Очікування клопотання про проведення кваліфікаційної експертизи
- Формальна експертиза
- Встановлення дати подання
- Реєстрація первинних документів, попередня експертиза та введення відомостей до бази даних

Позначення

- Поточна стадія
- Пройдена стадія
- Стадія, що не використовується у діловодстві за заявкою

Документи

#	Дата реєстрації	Дата відправки	Назва документа	Реєстраційний номер
1	20.03.2025		[K51] Опис винаходу (КМ)	25/ЗУ/Вх№5040
2	20.03.2025		[K53] Креслення	25/ЗУ/Вх№5041
3	20.03.2025		[K50] Формула винаходу (КМ)	25/ЗУ/Вх№5039
4	20.03.2025		[K52] Реферат	25/ЗУ/Вх№5042
5	20.03.2025		[E1] Платіжне доручення	25/ЗУ/Вх№5044
6	20.03.2025		[K71] Заява на видачу патенту на винахід (КМ)	25/ЗУ/Вх№5038
7	20.03.2025		[E11] Лист	25/ЗУ/Вх№5043
8	25.03.2025	02.04.2025	[B4] Повідомлення про встановлення дати подання заявки на винахід (корисну модель) Трекінг-номер відправлення (Укрпошта): 0601000234242	4994/ЗУ/25

Збори

#	Код збору	Початок очікування	Планова дата отримання	Фактична дата отримання	Планова сума сплати	Назва документа
1	10100	20.03.2025	20.05.2025	17.03.2025	480 UAH	За подання заявки (міжнародної заявки) на винахід (корисну модель), формула якого містить не більш як 3 пункти

Платежі (зараховані)

#	Сума сплати	Номер платежу	Дата отримання	Назва платежу
1	480 UAH	@2PL002826	17.03.2025	Платіжне доручення

Додаток В. Результати симуляції процесу руйнування зерна стиском

Таблиця В.1 – Зведені дані результатів симуляції процесу руйнування зерна стиском

№	x ₁	x ₂	x ₃	v	E _p , МПа	W _p , МПа	Кукурудза			Пшениця			Ячмінь		
							Вертика- льно, Н	На бічній поверхні, Н	Горизон- тально, Н	Вертика- льно, Н	На бічній поверхні, Н	Горизон- тально, Н	Вертика- льно, Н	На бічній поверхні, Н	Горизон- тально, Н
1	-1	-1	-1	0,3	10	1	305	248	414	93	130	171	41	61	85
2	-1	-1	0	0,3	10	2	195	244	336	133	181	250	58	86	124
3	-1	-1	1	0,3	10	3	258	414	545	260	319	501	114	151	248
4	-1	0	-1	0,3	25	1	279	289	444	47	68	87	21	32	43
5	-1	0	0	0,3	25	2	374	445	691	75	97	150	33	46	74
6	-1	0	1	0,3	25	3	488	947	1297	177	222	352	77	105	175
7	-1	1	-1	0,3	40	1	288	242	393	42	51	76	18	24	38
8	-1	1	0	0,3	40	2	606	712	1179	82	113	154	36	54	76
9	-1	1	1	0,3	40	3	790	1524	2136	193	270	352	84	128	174
10	0	-1	-1	0,4	10	1	299	233	425	89	107	162	39	51	80
11	0	-1	0	0,4	10	2	190	239	270	141	191	248	62	90	123
12	0	-1	1	0,4	10	3	244	409	499	211	268	401	92	126	199
13	0	0	-1	0,4	25	1	267	263	353	44	62	83	19	29	41
14	0	0	0	0,4	25	2	352	428	621	83	104	146	36	49	73
15	0	0	1	0,4	25	3	450	905	1239	159	224	289	70	106	143
16	0	1	-1	0,4	40	1	296	300	478	43	56	85	19	27	42
17	0	1	0	0,4	40	2	583	652	1131	84	125	153	37	59	76
18	0	1	1	0,4	40	3	771	1552	2157	178	220	317	78	104	157
19	1	-1	-1	0,5	10	1	290	240	368	91	119	171	40	56	85

№	x ₁	x ₂	x ₃	v	E _p , МПа	W _p , МПа	Кукурудза			Пшениця			Ячмінь		
							Вертикально, Н	На бічній поверхні, Н	Горизонтально, Н	Вертикально, Н	На бічній поверхні, Н	Горизонтально, Н	Вертикально, Н	На бічній поверхні, Н	Горизонтально, Н
20	1	-1	0	0,5	10	2	180	239	247	129	159	258	56	75	128
21	1	-1	1	0,5	10	3	231	421	465	184	272	333	81	129	165
22	1	0	-1	0,5	25	1	251	243	366	48	70	92	21	33	46
23	1	0	0	0,5	25	2	344	400	618	83	106	162	36	50	80
24	1	0	1	0,5	25	3	433	852	1136	142	199	257	62	94	127
25	1	1	-1	0,5	40	1	285	211	312	45	65	87	20	31	43
26	1	1	0	0,5	40	2	591	585	1050	83	113	152	36	53	75
27	1	1	1	0,5	40	3	774	1458	2056	150	204	286	66	96	142

Лістинг коду В.1 – Розрахунок рівняння регресії сили руйнування зерна стиском в програмному пакеті Wolfram Cloud

```

Mz={{-1,-1,-1,414},{-1,-1,0,336},{-1,-1,1,545},{0,-1,-1,444},{0,-1,0,691},{0,-1,1,1297},{1,-1,-1,393},{1,-1,0,1179},{1,-1,1,2136},{-1,0,-1,425},{-1,0,0,270},{-1,0,1,499},{0,0,-1,353},{0,0,0,621},{0,0,1,1239},{1,0,-1,478},{1,0,0,1131},{1,0,1,2157},{-1,1,-1,368},{-1,1,0,247},{-1,1,1,465},{0,1,-1,366},{0,1,0,618},{0,1,1,1136},{1,1,-1,312},{1,1,0,1050},{1,1,1,2056}};

nlmz=NonlinearModelFit[Mz,a00+a10*x1+a20*x2+a30*x3+a12*x1*x2+a13*x1*x3+a23*x2*x3+a11*x1^2+a22*x2^2+a33*x3^2,{a00,a10,a20,a30,a12,a13,a23,a11,a22,a33},{x1,x2,x3}];

Normal[nlmz]

nlmz["ParameterTable"]

nlmz["ANOVATable"]

```

```

My={{-1,-1,-1,248},{-1,-1,0,244},{-1,-1,1,414},{0,-1,-1,289},{0,-1,0,445},{0,-1,1,947},{1,-1,-1,242},{1,-1,0,712},{1,-
1,1,1524},{-1,0,-1,233},{-1,0,0,239},{-1,0,1,409},{0,0,-1,263},{0,0,0,428},{0,0,1,905},{1,0,-
1,300},{1,0,0,652},{1,0,1,1552},{-1,1,-1,240},{-1,1,0,239},{-1,1,1,421},{0,1,-1,243},{0,1,0,400},{0,1,1,852},{1,1,-
1,211},{1,1,0,585},{1,1,1,1458}};

nlmy=NonlinearModelFit[My,a00+a10*x1+a20*x2+a30*x3+a12*x1*x2+a13*x1*x3+a23*x2*x3+a11*x1^2+a22*x2^2+a
33*x3^2,{a00,a10,a20,a30,a12,a13,a23,a11,a22,a33},{x1,x2,x3}];

Normal[nlmy]
nlmy["ParameterTable"]
nlmy["ANOVATable"]

Mx={{-1,-1,-1,305},{-1,-1,0,195},{-1,-1,1,258},{0,-1,-1,279},{0,-1,0,374},{0,-1,1,488},{1,-1,-1,288},{1,-1,0,606},{1,-
1,1,790},{-1,0,-1,299},{-1,0,0,190},{-1,0,1,244},{0,0,-1,267},{0,0,0,352},{0,0,1,450},{1,0,-1,296},{1,0,0,583},{1,0,1,771},{-
1,1,-1,290},{-1,1,0,180},{-1,1,1,231},{0,1,-1,251},{0,1,0,344},{0,1,1,433},{1,1,-1,285},{1,1,0,591},{1,1,1,774}};

nlmx=NonlinearModelFit[Mx,a00+a10*x1+a20*x2+a30*x3+a12*x1*x2+a13*x1*x3+a23*x2*x3+a11*x1^2+a22*x2^2+a
33*x3^2,{a00,a10,a20,a30,a12,a13,a23,a11,a22,a33},{x1,x2,x3}];

Normal[nlmx]
nlmx["ParameterTable"]
nlmx["ANOVATable"]

```

```

Fz[x1_,x2_,x3_]:=658.926+406.833 x1+51.7222 x1^2-45.3889 x2+443.167 x3+405.333 x1 x3+155.389 x3^2
Fy[x1_,x2_,x3_]:=433.37+252.722 x1-23.1111 x2+345.167 x3+271.5 x1 x3+159.056 x3^2
Fx[x1_,x2_,x3_]:=351.37+155.111 x1+38.8889 x1^2+104.389 x3+135.583 x1 x3
x10=25;
dx1=15;
x20=0.4;
dx2=0.1;
x30=2;
dx3=1;
FFz[Ep_,v_,Wp_]:=Fz[(Ep-x10)/dx1,(v-x20)/dx2,(Wp-x30)/dx3];
Expand[FFz[Ep,v,Wp]]
FFy[Ep_,v_,Wp_]:=Fy[(Ep-x10)/dx1,(v-x20)/dx2,(Wp-x30)/dx3];
Expand[FFy[Ep,v,Wp]]
FFx[Ep_,v_,Wp_]:=Fx[(Ep-x10)/dx1,(v-x20)/dx2,(Wp-x30)/dx3];
Expand[FFx[Ep,v,Wp]]
Plot3D[{FFz[Ep,x20,Wp],FFy[Ep,x20,Wp],FFx[Ep,x20,Wp]},{Ep,x10-dx1,x10+dx1},{Wp,x30-
dx3,x30+dx3},PlotStyle->{Directive[Opacity[0.8],Orange],Directive[Opacity[0.7],Green],Directive[Opacity[0.6],Magenta]},
Plot3D[{FFz[Ep,v,x30],FFy[Ep,v,x30],FFx[Ep,v,x30]},{Ep,x10-dx1,x10+dx1},{v,x20-dx2,x20+dx2},PlotStyle-
>{Directive[Opacity[0.8],Orange],Directive[Opacity[0.7],Green],Directive[Opacity[0.6],Magenta]},
Plot3D[{FFz[x10,v,Wp],FFy[x10,v,Wp],FFx[x10,v,Wp]},{v,x20-dx2,x20+dx2},{Wp,x30-dx3,x30+dx3},PlotStyle-
>{Directive[Opacity[0.8],Orange],Directive[Opacity[0.7],Green],Directive[Opacity[0.6],Magenta]}

```

Додаток Г. Результати симуляції процесу руйнування зерна ударним різанням

Таблиця Г.1 – Зведені дані результатів симуляції процесу руйнування зерна ударним різанням

№	x ₅	x ₄	x ₆	α , °	l, мм	V, м/с	Кукурудза			Пшениця			Ячмінь		
							Вертикально, Н	На бічній поверхні, Н	Горизонтально, Н	Вертикально, Н	На бічній поверхні, Н	Горизонтально, Н	Вертикально, Н	На бічній поверхні, Н	Горизонтально, Н
1	-1	-1	-1	10	1	4,72	136	328	896	57	141	93	39	83	52
2	-1	-1	0	10	1	7,07	147	335	916	59	140	84	41	83	45
3	-1	-1	1	10	1	9,42	183	296	810	77	129	138	53	78	85
4	-1	0	-1	35	1	4,72	86	145	280	38	134	117	27	78	65
5	-1	0	0	35	1	7,07	84	172	191	36	84	80	24	49	44
6	-1	0	1	35	1	9,42	89	158	180	35	94	66	25	55	36
7	-1	1	-1	60	1	4,72	31	79	206	16	32	22	11	19	12
8	-1	1	0	60	1	7,07	30	85	197	13	31	25	9	18	13
9	-1	1	1	60	1	9,42	34	75	224	14	35	25	10	21	14
10	0	-1	-1	10	1,5	4,72	136	240	600	56	144	81	39	86	45
11	0	-1	0	10	1,5	7,07	146	240	565	64	146	65	43	86	35
12	0	-1	1	10	1,5	9,42	172	251	591	73	130	77	50	77	42
13	0	0	-1	35	1,5	4,72	82	161	260	34	89	62	23	53	33
14	0	0	0	35	1,5	7,07	82	133	269	35	64	76	24	37	41
15	0	0	1	35	1,5	9,42	85	125	278	36	75	46	24	44	26
16	0	1	-1	60	1,5	4,72	27	75	224	11	34	21	7	21	11
17	0	1	0	60	1,5	7,07	29	85	222	15	34	19	10	21	10
18	0	1	1	60	1,5	9,42	33	88	233	11	36	17	7	22	9
19	1	-1	-1	10	2	4,72	119	202	551	48	124	81	33	74	45

№	x ₅	x ₄	x ₆	α, °	l, мм	V, м/с	Кукурудза			Пшениця			Ячмінь		
							Вертикально, Н	На бічній поверхні, Н	Горизонтально, Н	Вертикально, Н	На бічній поверхні, Н	Горизонтально, Н	Вертикально, Н	На бічній поверхні, Н	Горизонтально, Н
20	1	-1	0	10	2	7,07	138	193	529	62	90	69	42	55	38
21	1	-1	1	10	2	9,42	177	212	581	71	101	65	49	60	36
22	1	0	-1	35	2	4,72	89	136	159	38	84	58	27	50	32
23	1	0	0	35	2	7,07	78	129	180	33	78	74	23	46	40
24	1	0	1	35	2	9,42	83	107	172	36	82	58	25	48	32
25	1	1	-1	60	2	4,72	33	72	145	11	23	23	8	13	12
26	1	1	0	60	2	7,07	24	66	187	9	29	25	6	17	13
27	1	1	1	60	2	9,42	31	59	220	12	35	22	9	20	12

Лістинг коду Г.1 – Розрахунок рівняння регресії сили руйнування зерна ударним різанням в програмному пакеті

Wolfram Cloud

$Mz = \{ \{-1, -1, -1, 896\}, \{-1, -1, 0, 916\}, \{-1, -1, 1, 810\}, \{0, -1, -1, 280\}, \{0, -1, 0, 191\}, \{0, -1, 1, 180\}, \{1, -1, -1, 206\}, \{1, -1, 0, 197\}, \{1, -1, 1, 224\}, \{-1, 0, -1, 600\}, \{-1, 0, 0, 565\}, \{-1, 0, 1, 591\}, \{0, 0, -1, 260\}, \{0, 0, 0, 269\}, \{0, 0, 1, 278\}, \{1, 0, -1, 224\}, \{1, 0, 0, 222\}, \{1, 0, 1, 233\}, \{-1, 1, -1, 551\}, \{-1, 1, 0, 529\}, \{-1, 1, 1, 581\}, \{0, 1, -1, 159\}, \{0, 1, 0, 180\}, \{0, 1, 1, 172\}, \{1, 1, -1, 145\}, \{1, 1, 0, 187\}, \{1, 1, 1, 220\} \};$

$nlmz = \text{NonlinearModelFit}[Mz, a00 + a10*x1 + a20*x2 + a30*x3 + a12*x1*x2 + a13*x1*x3 + a23*x2*x3 + a11*x1^2 + a22*x2^2 + a33*x3^2, \{a00, a10, a20, a30, a12, a13, a23, a11, a22, a33\}, \{x1, x2, x3\}];$

Normal[nlmz]

nlmz["ParameterTable"]

```
nlmz["ANOVATable"]
```

```
My={{-1,-1,-1,328},{-1,-1,0,335},{-1,-1,1,296},{0,-1,-1,145},{0,-1,0,172},{0,-1,1,158},{1,-1,-1,79},{1,-1,0,85},{1,-1,1,75},{-1,0,-1,240},{-1,0,0,240},{-1,0,1,251},{0,0,-1,161},{0,0,0,133},{0,0,1,125},{1,0,-1,75},{1,0,0,85},{1,0,1,88},{-1,1,-1,202},{-1,1,0,193},{-1,1,1,212},{0,1,-1,136},{0,1,0,129},{0,1,1,107},{1,1,-1,72},{1,1,0,66},{1,1,1,59}};
```

```
nlmy=NonlinearModelFit[My,a00+a10*x1+a20*x2+a30*x3+a12*x1*x2+a13*x1*x3+a23*x2*x3+a11*x1^2+a22*x2^2+a33*x3^2,{a00,a10,a20,a30,a12,a13,a23,a11,a22,a33},{x1,x2,x3}];
```

```
Normal[nlmy]
```

```
nlmy["ParameterTable"]
```

```
nlmy["ANOVATable"]
```

```
Mx={{-1,-1,-1,136},{-1,-1,0,147},{-1,-1,1,183},{0,-1,-1,86},{0,-1,0,84},{0,-1,1,89},{1,-1,-1,31},{1,-1,0,30},{1,-1,1,34},{-1,0,-1,136},{-1,0,0,146},{-1,0,1,172},{0,0,-1,82},{0,0,0,82},{0,0,1,85},{1,0,-1,27},{1,0,0,29},{1,0,1,33},{-1,1,-1,119},{-1,1,0,138},{-1,1,1,177},{0,1,-1,89},{0,1,0,78},{0,1,1,83},{1,1,-1,33},{1,1,0,24},{1,1,1,31}};
```

```
nlmx=NonlinearModelFit[Mx,a00+a10*x1+a20*x2+a30*x3+a12*x1*x2+a13*x1*x3+a23*x2*x3+a11*x1^2+a22*x2^2+a33*x3^2,{a00,a10,a20,a30,a12,a13,a23,a11,a22,a33},{x1,x2,x3}];
```

```
Normal[nlmx]
```

```
nlmx["ParameterTable"]
```

```
nlmx["ANOVATable"]
```

```

Fz[x1_,x2_,x3_]:=209.989-232.264 x1+219.95 x1^2-65.3294 x2+73.8124 x1 x2
Fy[x1_,x2_,x3_]:=141.096-89.5171 x1+24.9607 x1^2-27.6001 x2+25.7416 x1 x2
Fx[x1_,x2_,x3_]:=79.749-60.1056 x1+6.13889 x1^2+8.21611 x3-11.1592 x1 x3+6.13256 x3^2
x10=35;
dx1=25;
x20=1.5;
dx2=0.5;
x30=7.07;
dx3=2.35;
FFz[α_,l_,V_]:=Fz[(α-x10)/dx1,(l-x20)/dx2,(V-x30)/dx3];
Expand[FFz[α,l,V]]
FFy[α_,l_,V_]:=Fy[(α-x10)/dx1,(l-x20)/dx2,(V-x30)/dx3];
Expand[FFy[α,l,V]]
FFx[α_,l_,V_]:=Fx[(α-x10)/dx1,(l-x20)/dx2,(V-x30)/dx3];
Expand[FFx[α,l,V]]
Plot3D[{FFz[α,x20,V],FFy[α,x20,V],FFx[α,x20,V]},{α,x10-dx1,x10+dx1},{V,x30-dx3,x30+dx3},PlotStyle-
>{Directive[Opacity[0.8],Orange],Directive[Opacity[0.7],Green],Directive[Opacity[0.6],Magenta]},
Plot3D[{FFz[α,l,x30],FFy[α,l,x30],FFx[α,l,x30]},{α,x10-dx1,x10+dx1},{l,x20-dx2,x20+dx2},PlotStyle-
>{Directive[Opacity[0.8],Orange],Directive[Opacity[0.7],Green],Directive[Opacity[0.6],Magenta]},

```

```
Plot3D[{FFz[x10,l,V],FFy[x10,l,V],FFx[x10,l,V]},{l,x20-dx2,x20+dx2},{V,x30-dx3,x30+dx3},PlotStyle-
>{Directive[Opacity[0.8],Orange],Directive[Opacity[0.7],Green],Directive[Opacity[0.6],Magenta]}
```

Лістинг коду Г.2 – Комплексна оцінка результатів симуляції процесу руйнування зерна ударним різанням

```
Fcz[l_,α_,V_]:=1472.26-337.334 l-42.7824 α+5.90499 l α+0.35192 α^2;
Fcy[l_,α_,V_]:=506.258-127.277 l-9.46527 α+2.05933 l α+0.0399371 α^2;
Fcx[l_,α_,V_]:=159.716-5.55777 V+1.11047 V^2-1.74888 α-0.189944 V α+0.00982222 α^2;
```

```
Fwz[l_,α_,V_]:=133.741-42.5066 l-0.193652 α+0.657696 l α-0.0289088 α^2;
Fwy[l_,α_,V_]:=178.8-19.0944 l-1.90109 α;
Fwx[l_,α_,V_]:=38.8957+4.4368 V-0.391895 α-0.0876715 V α;
```

```
Fbz[l_,α_,V_]:=56.9373-11.7724 l+0.333859 α-0.0147722 α^2;
Fby[l_,α_,V_]:=105.222-11.0936 l-1.13344 α;
Fbx[l_,α_,V_]:=27.4718+2.90126 V-0.284666 α-0.057903 V α;
```

```
lmin=1;
lmax= 2;
Vmin=4.72 ;
```

Vmax= 9.42;

$\alpha_{\min}=10$;

$\alpha_{\max}=60$;

OptFcz=FindMinimum[{ Fcz[l, α ,V],

lmin<=l<=lmax, $\alpha_{\min}$ <= α <= $\alpha_{\max}$,Vmin<=V<=Vmax},{1,0.5(lmin+lmax)},{ α ,0.5($\alpha_{\min}+\alpha_{\max}$)},{ V,0.5(Vmin+ Vmax)}}];

FczMin=First[OptFcz];

OptFcz=FindMaximum[{ Fcz[l, α ,V],

lmin<=l<=lmax, $\alpha_{\min}$ <= α <= $\alpha_{\max}$,Vmin<=V<=Vmax},{1,0.5(lmin+lmax)},{ α ,0.5($\alpha_{\min}+\alpha_{\max}$)},{ V,0.5(Vmin+ Vmax)}}];

FczMax=First[OptFcz];

OptFcy=FindMinimum[{ Fcy[l, α ,V],

lmin<=l<=lmax, $\alpha_{\min}$ <= α <= $\alpha_{\max}$,Vmin<=V<=Vmax},{1,0.5(lmin+lmax)},{ α ,0.5($\alpha_{\min}+\alpha_{\max}$)},{ V,0.5(Vmin+ Vmax)}}];

FcyMin=First[OptFcy];

OptFcy=FindMaximum[{ Fcy[l, α ,V],

lmin<=l<=lmax, $\alpha_{\min}$ <= α <= $\alpha_{\max}$,Vmin<=V<=Vmax},{1,0.5(lmin+lmax)},{ α ,0.5($\alpha_{\min}+\alpha_{\max}$)},{ V,0.5(Vmin+ Vmax)}}];

FcyMax=First[OptFcy];

OptFcx=FindMinimum[{ Fcx[l, α ,V],

lmin<=l<=lmax, $\alpha_{\min}$ <= α <= $\alpha_{\max}$,Vmin<=V<=Vmax},{1,0.5(lmin+lmax)},{ α ,0.5($\alpha_{\min}+\alpha_{\max}$)},{ V,0.5(Vmin+ Vmax)}}];

```

FcxMin=First[OptFcx];
OptFcx=FindMaximum[ { Fcx[l,α,V],
  lmin<=l<=lmax,αmin<=α<=αmax,Vmin<=V<=Vmax},{l,0.5(lmin+lmax)},{ α,0.5(αmin+αmax)},{ V,0.5( Vmin+ Vmax)}];
FcxMax=First[OptFcx];
Kc [l_,α_,V_] := ( (V-Vmin)/(Vmax-Vmin))*
  ( (Fcx[l,α,V]-FcxMin)/(FcxMax-FcxMin))*
  ( (Fcy[l,α,V]-FcyMin)/(FcyMax-FcyMin))*
  ( (Fcz[l,α,V]-FczMin)/(FczMax-FczMin))*
  ( (lmax-l)/(lmax-lmin));
Opt=FindMinimum[ { Kc[l,α,V],
  lmin<=l<=lmax,αmin<=α<=αmax,Vmin<=V<=Vmax},{l,0.5(lmin+lmax)},{ α,0.5( αmin+ αmax)},{ V,0.5( Vmin+ Vmax)}]
lopt=l/.Last[Opt];
αopt= α/.Last[Opt];
Vopt= V/.Last[Opt];
Fcx[lopt,αopt,Vopt]
Fcy[lopt,αopt,Vopt]
Fcz[lopt,αopt,Vopt]
60*Vopt/(2*3.14*0.03)
lopt-2*0.5
αopt/2

```

Додаток Д. Результати експериментальних досліджень базового дискового подрібнювача

Таблиця Д.1 – Зведені дані результатів експериментальних досліджень подрібнення зерна кукурудзи базовим дисковим подрібнювачем

№	x ₇	x ₈	x ₉	G, кг/год	δ, мм	n, об/хв	Q, кг/год				N, Вт				q, кВт·год/т				a, %				λ			
							1	2	3	Сер.	1	2	3	Сер.	1	2	3	Сер.	1	2	3	Сер.	1	2	3	Сер.
1	-1	-1	0	450	0,6	2250	103	108	105	105,3	777	848	757	793,8	7,6	7,8	7,2	7,5	15,5	14,7	15,3	15,15	7,1	6,8	7,2	7,05
2	-1	0	-1	450	1,1	1500	106	115	112	110,8	311	346	360	338,7	2,9	3,0	3,2	3,1	5,8	5,8	6,2	6,04	4,3	4,5	4,3	4,39
3	-1	0	1	450	1,1	3000	122	120	113	118,2	545	564	548	553,0	4,5	4,7	4,8	4,7	8,8	9	8,0	8,62	4,8	4,8	5,4	4,98
4	-1	1	0	450	1,6	2250	107	111	116	111,3	410	432	409	417,5	3,8	3,9	3,5	3,8	5,3	5,3	5,2	5,34	4,3	4,1	4,1	4,19
5	0	-1	-1	900	0,6	1500	84	91	90	88,1	465	474	485	475,0	5,5	5,2	5,4	5,4	10,7	10,5	9,7	10,33	5,5	5,7	5,6	5,61
6	0	-1	1	900	0,6	3000	188	195	209	197,2	771	794	887	816,8	4,1	4,1	4,2	4,1	14,6	14	15,4	14,66	6,7	6,5	6,3	6,50
7	0	0	0	900	1,1	2250	158	159	143	153,4	753	767	606	706,6	4,8	4,8	4,2	4,6	8,6	8,7	8,3	8,51	5,1	4,9	4,6	4,83
8	0	0	0	900	1,1	2250	156	150	161	155,4	729	714	800	747,2	4,7	4,8	5,0	4,8	8,9	8,7	7,8	8,46	5,0	4,8	4,8	4,87
9	0	0	0	900	1,1	2250	159	161	143	154,3	727	768	645	712,5	4,6	4,8	4,5	4,6	8,7	8,8	8,0	8,57	4,9	4,7	4,9	4,82
10	0	1	-1	900	1,6	1500	115	117	126	119,2	276	277	326	292,7	2,4	2,4	2,6	2,5	3,3	3,3	3	3,21	3,9	3,9	3,6	3,83
11	0	1	1	900	1,6	3000	230	229	204	220,7	557	533	516	535,9	2,4	2,3	2,5	2,4	5,8	5,8	6,2	5,94	4,5	4,4	4,2	4,36
12	1	-1	0	1350	0,6	2250	230	230	209	223,2	993	1033	996	1008,8	4,3	4,5	4,8	4,5	18,4	18,5	17,2	18,13	7,7	7,6	7,0	7,45
13	1	0	-1	1350	1,1	1500	123	125	133	127,2	430	426	488	447,9	3,5	3,4	3,7	3,5	11,5	12	11,2	11,68	5,0	4,9	4,5	4,83
14	1	0	1	1350	1,1	3000	229	238	236	234,2	866	838	840	848,2	3,8	3,5	3,6	3,6	15,2	16,4	15,2	15,62	5,8	5,8	5,1	5,56
15	1	1	0	1350	1,6	2250	225	220	201	215,5	631	667	595	631,5	2,8	3,0	3,0	2,9	8,6	8,7	8,7	8,66	4,1	4,1	4,4	4,23

Таблиця Д.2 – Зведені дані результатів експериментальних досліджень подрібнення зерна пшениці базовим дисковим подрібнювачем

№	x ₇	x ₈	x ₉	G, кг/год	δ, мм	n, об/хв	Q, кг/год				N, Вт				q, кВт·год/т				a, %				λ			
							1	2	3	Сер.	1	2	3	Сер.	1	2	3	Сер.	1	2	3	Сер.	1	2	3	Сер.
1	-1	-1	0	450	0,6	2250	133	136	130	133,0	976	952	877	935,0	7,4	7,0	6,7	7,0	6,4	6,4	6,3	6,38	3,2	3,2	3,0	3,12
2	-1	0	-1	450	1,1	1500	155	161	170	161,8	530	550	586	555,3	3,4	3,4	3,5	3,4	0,6	0,6	0,5	0,55	2,0	1,9	1,9	1,92
3	-1	0	1	450	1,1	3000	215	223	201	213,3	684	684	658	676,2	3,2	3,1	3,3	3,2	2,5	2,5	2,7	2,56	2,3	2,2	2,3	2,29
4	-1	1	0	450	1,6	2250	205	210	212	209,2	842	863	872	859,1	4,1	4,1	4,1	4,1	0,5	0,5	0,4	0,45	2,0	1,9	1,8	1,90
5	0	-1	-1	900	0,6	1500	105	107	108	106,5	529	543	592	554,5	5,0	5,1	5,5	5,2	3,6	3,5	3,9	3,64	2,3	2,4	2,7	2,45
6	0	-1	1	900	0,6	3000	217	228	217	220,8	931	939	953	941,4	4,3	4,1	4,4	4,3	6,1	5,8	5,8	5,89	2,7	2,8	2,9	2,84
7	0	0	0	900	1,1	2250	201	204	186	196,8	821	796	688	767,4	4,1	3,9	3,7	3,9	1,7	1,8	1,8	1,76	2,0	2,2	2,1	2,09
8	0	0	0	900	1,1	2250	205	197	206	202,6	848	798	759	801,6	4,1	4,0	3,7	4,0	1,9	2,1	2,0	1,99	2,1	2,1	2,2	2,12
9	0	0	0	900	1,1	2250	213	212	186	203,8	890	877	696	819,8	4,2	4,1	3,7	4,0	1,9	1,9	1,9	1,91	2,1	2,2	2,0	2,11
10	0	1	-1	900	1,6	1500	208	217	230	218,4	377	409	414	400,2	1,8	1,9	1,8	1,8	0,2	0,2	0,2	0,18	1,9	1,9	1,8	1,85
11	0	1	1	900	1,6	3000	288	289	252	276,6	591	585	579	586,9	2,1	2,0	2,3	2,1	1,9	1,7	1,7	1,77	2,0	2,2	2,1	2,10
12	1	-1	0	1350	0,6	2250	141	139	156	145,0	721	725	900	779,8	5,1	5,2	5,8	5,4	8,5	8,1	8,4	8,32	3,1	3,3	3,2	3,21
13	1	0	-1	1350	1,1	1500	157	152	147	152,0	668	624	564	617,8	4,2	4,1	3,8	4,1	2,4	2,4	2,3	2,34	2,0	2,0	2,1	2,05
14	1	0	1	1350	1,1	3000	230	227	257	238,1	556	552	550	554,3	2,4	2,4	2,1	2,3	4,4	4,2	4,7	4,43	2,4	2,3	2,6	2,44
15	1	1	0	1350	1,6	2250	251	248	239	246,2	677	654	595	641,5	2,7	2,6	2,5	2,6	1,5	1,7	1,7	1,63	2,0	2,0	1,7	1,91

Таблиця Д.3 – Зведені дані результатів експериментальних досліджень подрібнення зерна ячменя базовим дисковим подрібнювачем

№	x ₇	x ₈	x ₉	G, кг/год	δ, мм	n, об/хв	Q, кг/год				N, Вт				q, кВт·год/т				a, %				λ			
							1	2	3	Сер.	1	2	3	Сер.	1	2	3	Сер.	1	2	3	Сер.	1	2	3	Сер.
1	-1	-1	0	450	0,6	2250	70	73	79	73,8	938	1014	1132	1026,8	13,4	14,0	14,4	13,9	3,9	3,9	4,4	4,05	3,0	3,0	2,7	2,89
2	-1	0	-1	450	1,1	1500	80	78	78	78,4	587	578	532	565,4	7,4	7,4	6,8	7,2	1,1	1,1	1,1	1,12	2,1	1,9	2,0	1,99
3	-1	0	1	450	1,1	3000	121	130	120	123,9	792	809	820	807,8	6,5	6,2	6,8	6,5	2,0	2,0	2,2	2,06	2,2	2,3	2,2	2,21
4	-1	1	0	450	1,6	2250	118	116	135	123,1	1020	1051	1080	1053,5	8,7	9,0	8,0	8,6	0,7	0,6	0,6	0,64	1,9	2,0	1,8	1,91
5	0	-1	-1	900	0,6	1500	58	58	64	59,9	564	615	673	616,9	9,8	10,7	10,5	10,3	2,3	2,2	2,2	2,21	2,4	2,4	2,4	2,39
6	0	-1	1	900	0,6	3000	106	110	115	110,3	873	975	931	926,5	8,3	8,8	8,1	8,4	4,0	3,7	3,8	3,84	2,5	2,6	2,9	2,68
7	0	0	0	900	1,1	2250	112	107	110	109,8	810	774	857	813,5	7,2	7,2	7,8	7,4	1,5	1,4	1,6	1,51	2,1	2,0	2,1	2,08
8	0	0	0	900	1,1	2250	105	101	106	104,4	886	809	874	859,0	8,4	8,0	8,3	8,2	1,5	1,5	1,4	1,44	2,2	2,1	2,1	2,11
9	0	0	0	900	1,1	2250	104	101	113	105,9	799	769	994	851,5	7,7	7,6	8,8	8,0	1,5	1,5	1,3	1,45	2,1	2,1	2,0	2,10
10	0	1	-1	900	1,6	1500	123	116	125	121,3	479	448	486	471,4	3,9	3,9	3,9	3,9	0,2	0,2	0,2	0,22	1,8	1,7	2,1	1,85
11	0	1	1	900	1,6	3000	163	154	159	158,9	654	592	695	647,5	4,0	3,8	4,4	4,1	1,6	1,5	1,5	1,54	2,0	2,0	2,1	2,03
12	1	-1	0	1350	0,6	2250	75	79	83	79,0	768	788	840	798,5	10,3	10,0	10,1	10,1	5,2	5,2	4,7	5,04	3,2	2,9	2,9	2,99
13	1	0	-1	1350	1,1	1500	78	76	81	78,3	671	604	623	632,5	8,6	8,0	7,7	8,1	1,4	1,4	1,6	1,51	2,1	2,0	2,1	2,08
14	1	0	1	1350	1,1	3000	186	189	163	179,3	868	827	677	789,2	4,7	4,4	4,2	4,4	3,2	3,2	2,9	3,12	2,4	2,3	2,2	2,33
15	1	1	0	1350	1,6	2250	153	155	176	161,2	838	812	861	840,0	5,5	5,3	4,9	5,2	1,3	1,2	1,2	1,25	2,0	2,0	1,7	1,90

Лістинг коду Д.1 – Розрахунок в програмному пакеті Wolfram Cloud рівнянь регресії при подрібненні зерен кукурудзи, пшениці та ячменя базовим дисковим подрібнювачем

```

Maize={{-1,-1,0,15.14667},{-1,0,-1,6.036667},{-1,0,1,8.6211},{-
1,1,0,5.343333},{0,-1,-1,10.32667},{0,-
1,1,14.6578},{0,0,0,8.5136},{0,0,0,8.456667},{0,0,0,8.568167},{0,1,-
1,3.2119},{0,1,1,5.9408},{1,-1,0,18.13333},{1,0,-
1,11.67667},{1,0,1,15.6173},{1,1,0,8.663333}}};
nlMaize=NonlinearModelFit[Maize,a00+a10*x1+a20*x2+a30*x3+a12*x1*x2+a13*x1*x
3+a23*x2*x3+a11*x1^2+a22*x2^2+a33*x3^2,{a00,a10,a20,a30,a12,a13,a23,a11,a22,a33
},{x1,x2,x3}];
Normal[nlMaize]
nlMaize["ParameterTable"]
nlMaize["ANOVATable"]

Wheat={{-1,-1,0,6.376667},{-1,0,-1,0.55169},{-1,0,1,2.5611083},{-
1,1,0,0.452739},{0,-1,-1,3.640793},{0,-
1,1,5.893333},{0,0,0,1.756667},{0,0,0,1.99213},{0,0,0,1.906667},{0,1,-
1,0.176667},{0,1,1,1.773333},{1,-1,0,8.323333},{1,0,-
1,2.343333},{1,0,1,4.426783},{1,1,0,1.626667}}};
nlWheat=NonlinearModelFit[Wheat,a00+a10*x1+a20*x2+a30*x3+a12*x1*x2+a13
*x1*x3+a23*x2*x3+a11*x1^2+a22*x2^2+a33*x3^2,{a00,a10,a20,a30,a12,a13,a23,a11,a
22,a33},{x1,x2,x3}];
Normal[nlWheat]
nlWheat["ParameterTable"]
nlWheat["ANOVATable"]

```

```
Barley={ {-1,-1,0,4.051111},{-1,0,-1,1.120846},{-1,0,1,2.061911},{-
1,1,0,0.638533},{0,-1,-1,2.213067},{0,-
1,1,3.840711},{0,0,0,1.513556},{0,0,0,1.436244},{0,0,0,1.451489},{0,1,-
1,0.218222},{0,1,1,1.544244},{1,-1,0,5.043933},{1,0,-
1,1.505489},{1,0,1,3.117889},{1,1,0,1.245889}};
```

```
nlBarley=NonlinearModelFit[Barley,a00+a10*x1+a20*x2+a30*x3+a12*x1*x2+a13
*x1*x3+a23*x2*x3+a11*x1^2+a22*x2^2+a33*x3^2,{a00,a10,a20,a30,a12,a13,a23,a11,a
22,a33},{x1,x2,x3}];
```

```
Normal[nlBarley]
```

```
nlBarley["ParameterTable"]
```

```
nlBarley["ANOVATable"]
```

```
Fz[x1_,x2_,x3_]:=8.51281+2.36786 x1+2.63125 x1^2-4.38814 x2+1.69814 x3
```

```
Fy[x1_,x2_,x3_]:=1.88515+0.847239 x1+0.954697 x1^2-2.52559 x2+1.355
x2^2+0.992759 x3
```

```
Fx[x1_,x2_,x3_]:=1.4671+0.3801 x1+0.637621 x1^2-1.43774 x2+0.640149
x2^2+0.688391 x3
```

```
x10=900;
```

```
dx1=450;
```

```
x20=1.1;
```

```
dx2=0.6;
```

```
x30=2250;
```

```
dx3=750;
```

```
FFz[G_,δ_,n_]:=Fz[(G-x10)/dx1,(δ-x20)/dx2,(n-x30)/dx3];
```

```
Expand[FFz[G,δ,n]]
```

```
FFy[G_,δ_,n_]:=Fy[(G-x10)/dx1,(δ-x20)/dx2,(n-x30)/dx3];
```

```
Expand[FFy[G,δ,n]]
```

```
FFx[G_,δ_,n_]:=Fx[(G-x10)/dx1,(δ-x20)/dx2,(n-x30)/dx3];
```

```
Expand[FFx[G,δ,n]]
```

```

Plot3D[{FFz[G,x20,n]/2,FFy[G,x20,n],FFx[G,x20,n]}, {G,x10-dx1,x10+dx1}, {n,x30-
dx3,x30+dx3},PlotStyle-
>{Directive[Opacity[0.8],Orange],Directive[Opacity[0.7],Green],Directive[Opacity[0.6],
Magenta]}},
Plot3D[{FFz[G,δ,x30]/2,FFy[G,δ,x30],FFx[G,δ,x30]}, {G,x10-
dx1,x10+dx1}, {δ,x20-dx2,x20+dx2},PlotStyle-
>{Directive[Opacity[0.8],Orange],Directive[Opacity[0.7],Green],Directive[Opacity[0.6],
Magenta]}},
Plot3D[{FFz[x10,δ,n]/2,FFy[x10,δ,n],FFx[x10,δ,n]}, {δ,x20-dx2,x20+dx2}, {n,x30-
dx3,x30+dx3},PlotStyle-
>{Directive[Opacity[0.8],Orange],Directive[Opacity[0.7],Green],Directive[Opacity[0.6],
Magenta]}

```

Лістинг коду Д.2 – Комплексна оцінка результатів експериментальних досліджень базового дискового подрібнювача

```

qc[G_,δ_,n_]:=-1.0887-0.00123129 G+0.00815232 n-1.81163*10^-6 n^2-2.08867 δ;
ac[G_,δ_,n_]:=17.2526-0.018127 G+0.0000129938 G^2+0.00226419 n-7.31357 δ;
λc[G_,δ_,n_]:=7.81781+0.000457428 n-5.20295 δ+1.41773 δ^2;

qw[G_,δ_,n_]:=-2.23111-0.000933791 G+0.00853272 n-1.89616*10^-6 n^2-
2.33485 δ;
aw[G_,δ_,n_]:=10.2157-0.00660344 G+4.71455*10^-6 G^2+0.00132368 n-12.4899
δ+3.76389 δ^2;
λw[G_,δ_,n_]:=3.40702+0.0002345 n-2.51973 δ+0.780097 δ^2;

qb[G_,δ_,n_]:=-3.75982-0.0023348 G+0.0165049 n-3.66775*10^-6 n^2-4.37493 δ;
ab[G_,δ_,n_]:=5.97968-0.00482308 G+3.14875*10^-6 G^2+0.000917855 n-
6.30826 δ+1.77819 δ^2;
λb[G_,δ_,n_]:=3.1515+0.000164312 n-1.89426 δ+0.547372 δ^2;

```

Gmin=450;

Gmax= 1350;

$\delta_{\min}$ =0.6;

$\delta_{\max}$ = 1.6;

nmin=1500;

nmax=3000;

Optqc=NMinimize[{ qc[G, δ ,n],

Gmin<=G<=Gmax, $\delta_{\min}$ <= δ <= $\delta_{\max}$,nmin<=n<=nmax}, {G, δ ,n}]

qcMin=First[Optqc];

Optqc=NMaximize[{ qc[G, δ ,n],

Gmin<=G<=Gmax, $\delta_{\min}$ <= δ <= $\delta_{\max}$,nmin<=n<=nmax}, {G, δ ,n}]

qcMax=First[Optqc];

Optac=NMinimize[{ ac[G, δ ,n],

Gmin<=G<=Gmax, $\delta_{\min}$ <= δ <= $\delta_{\max}$,nmin<=n<=nmax}, {G, δ ,n}]

acMin=First[Optac];

Optac=NMaximize[{ ac[G, δ ,n],

Gmin<=G<=Gmax, $\delta_{\min}$ <= δ <= $\delta_{\max}$,nmin<=n<=nmax}, {G, δ ,n}]

acMax=First[Optac];

Gmax= 1350;

$\delta_{\min}$ =0.6;

$\delta_{\max}$ = 1.6;

nmin=1500;

nmax=3000;

Optqc=NMinimize[{ qc[G, δ ,n],

Gmin<=G<=Gmax, $\delta_{\min}$ <= δ <= $\delta_{\max}$,nmin<=n<=nmax}, {G, δ ,n}]

```

qcMin=First[Optqc];
Optqc=NMaximize[ { qc[G,δ,n],
  Gmin<=G<=Gmax,δmin<=δ<=δmax,nmin<=n<=nmax}, {G,δ,n} ]
qcMax=First[Optqc];

Optac=NMinimize[ { ac[G,δ,n],
  Gmin<=G<=Gmax,δmin<=δ<=δmax,nmin<=n<=nmax}, {G,δ,n} ]
acMin=First[Optac];
Optac=NMaximize[ { ac[G,δ,n],
  Gmin<=G<=Gmax,δmin<=δ<=δmax,nmin<=n<=nmax}, {G,δ,n} ]
acMax=First[Optac];

Optλc=NMinimize[ { λc[G,δ,n],
  Gmin<=G<=Gmax,δmin<=δ<=δmax,nmin<=n<=nmax}, {G,δ,n} ]
λcMin=First[Optλc];
Optλc=NMaximize[ { λc[G,δ,n],
  Gmin<=G<=Gmax,δmin<=δ<=δmax,nmin<=n<=nmax}, {G,δ,n} ]
λcMax=First[Optλc];
Kc [G_,δ_,n_] := ( (qc[G,δ,n]-qcMin)/(qcMax-qcMin))*
  ( (ac[G,δ,n]-acMin)/(acMax-acMin));
Opt=NMinimize[ { Kc[G,δ,n],λc[G,δ,n]<9.4,λc[G,δ,n]>7.2,
  Gmin<=G<=Gmax,δmin<=δ<=δmax,nmin<=n<=nmax}, {G,δ,n} ]
Gopt=G/.Last[Opt];
δopt= δ/.Last[Opt];
nopt= n/.Last[Opt];
qc[Gopt,δopt,nopt]
ac[Gopt,δopt,nopt]
λc[Gopt,δopt,nopt]

```

```
Plot3D[{Kc [ G, $\delta$ ,nopt ]},{G,Gmin,Gmax},{  $\delta$ , $\delta$ min, $\delta$ max}, AxesLabel->{"G"," $\delta$ ","K"},LabelStyle->Directive[FontSize->14,FontFamily->"Times",PlotLegends->"Expressions"],Mesh->30,PlotStyle->{Gray}]
```

```
Plot3D[{Kc [G, $\delta$ opt,n ]},{G,Gmin,Gmax},{ n,nmin,nmax}, AxesLabel->{"G","n","K"},LabelStyle->Directive[FontSize->14,FontFamily->"Times",PlotLegends->"Expressions"],Mesh->30,PlotStyle->{Gray}]
```

```
Plot3D[{Kc [Gopt, $\delta$ ,n ]},{ $\delta$ , $\delta$ min, $\delta$ max},{ n,nmin,nmax}, AxesLabel->{" $\delta$ ","n","K"},LabelStyle->Directive[FontSize->14,FontFamily->"Times",PlotLegends->"Expressions"],Mesh->30,PlotStyle->{Gray}]
```

Додаток Е. Результати експериментальних досліджень удосконаленого дискового подрібнювача

Таблиця Е.1 – Зведені дані результатів експериментальних досліджень подрібнення зерна кукурудзи
удосконаленим дисковим подрібнювачем

№	x ₉	x ₁₁	x ₁₀	n, об/хв	β , °	z, шт	Q, кг/год				N, Вт				q, кВт·год/т				a, %				λ			
							1	2	3	Сер.	1	2	3	Сер.	1	2	3	Сер.	1	2	3	Сер.	1	2	3	Сер.
1	-1	-1	0	1500	10	9	174	176	171	173,8	709	709	703	707,2	4,1	4,0	4,1	4,1	5,2	4,9	5,4	5,16	5,4	5,5	5,4	5,45
2	-1	0	-1	1500	20	6	155	149	153	152,5	661	697	631	663,1	4,3	4,7	4,1	4,3	5,2	5,2	5,4	5,29	5,6	5,6	5,8	5,64
3	-1	0	1	1500	20	12	146	145	152	147,5	703	685	691	693,2	4,8	4,7	4,5	4,7	5,6	5,4	5,5	5,50	5,5	5,5	5,5	5,46
4	-1	1	0	1500	30	9	143	145	146	144,5	685	685	697	689,1	4,8	4,7	4,8	4,8	5,8	5,7	5,7	5,72	5,7	5,6	5,7	5,69
5	0	-1	-1	2250	10	6	179	173	174	175,3	721	733	721	725,2	4,0	4,2	4,1	4,1	6,2	6,2	6,3	6,25	5,9	6,0	6,0	5,94
6	0	-1	1	2250	10	12	162	168	162	164,4	751	727	769	749,2	4,6	4,3	4,7	4,6	6,6	6,6	6,3	6,47	6,0	6,0	6,0	6,01
7	0	0	0	2250	20	9	176	177	173	175,3	733	739	727	733,2	4,2	4,2	4,2	4,2	5,7	5,5	5,9	5,72	5,9	5,8	6,0	5,92
8	0	0	0	2250	20	9	174	171	173	172,6	722	715	727	721,5	4,2	4,2	4,2	4,2	5,6	5,7	5,7	5,74	6,0	6,1	6,1	6,07
9	0	0	0	2250	20	9	177	182	174	177,8	736	769	745	750,3	4,2	4,2	4,3	4,2	5,8	5,6	5,5	5,56	6,1	6,1	6,1	6,09
10	0	1	-1	2250	30	6	148	150	143	147,0	697	715	685	699,2	4,7	4,8	4,8	4,8	6,7	6,8	7,1	6,85	6,6	6,5	6,7	6,58
11	0	1	1	2250	30	12	137	136	139	137,1	727	703	691	707,2	5,3	5,2	5,0	5,2	7,1	7,4	7,3	7,27	6,8	6,9	6,8	6,84
12	1	-1	0	3000	10	9	198	210	203	203,6	721	727	715	721,2	3,6	3,5	3,5	3,5	6,7	6,5	6,6	6,61	6,9	7,0	7,0	6,99
13	1	0	-1	3000	20	6	173	173	168	171,4	679	661	673	671,1	3,9	3,8	4,0	3,9	6,8	6,9	6,8	6,86	7,0	7,0	7,0	7,01
14	1	0	1	3000	20	12	152	153	148	151,0	715	721	715	717,2	4,7	4,7	4,8	4,8	7,0	7,2	7,1	7,12	7,5	7,5	7,6	7,55
15	1	1	0	3000	30	9	162	164	158	161,4	691	739	709	713,2	4,3	4,5	4,5	4,4	7,1	7,1	7,3	7,14	7,5	7,5	7,5	7,48

Таблиця Е.2 – Зведені дані результатів експериментальних досліджень подрібнення зерна пшениці удосконаленим дисковим подрібнювачем

№	x ₉	x ₁₁	x ₁₀	n, об/хв	β, °	z, шт	Q, кг/год				N, Вт				q, кВт·год/т				a, %				λ			
							1	2	3	Сер.	1	2	3	Сер.	1	2	3	Сер.	1	2	3	Сер.	1	2	3	Сер.
1	-1	-1	0	1500	10	9	188	185	186	186,5	668	680	680	676,2	3,6	3,7	3,6	3,6	1,8	1,8	1,8	1,81	3,0	2,9	2,9	2,95
2	-1	0	-1	1500	20	6	165	171	160	165,2	614	584	656	618,1	3,7	3,4	4,1	3,7	1,8	1,8	1,9	1,83	3,0	3,0	3,1	3,02
3	-1	0	1	1500	20	12	151	155	156	154,0	686	734	674	698,3	4,5	4,8	4,3	4,5	1,9	1,9	2,0	1,92	3,0	2,9	2,9	2,96
4	-1	1	0	1500	30	9	155	146	146	149,0	626	638	650	638,1	4,1	4,4	4,4	4,3	2,0	2,0	2,0	1,99	3,1	3,0	3,1	3,08
5	0	-1	-1	2250	10	6	200	198	197	198,2	656	626	656	646,1	3,3	3,2	3,3	3,3	2,1	2,1	2,2	2,12	3,2	3,2	3,2	3,21
6	0	-1	1	2250	10	12	178	188	185	183,7	728	722	728	726,4	4,1	3,8	3,9	4,0	2,2	2,2	2,3	2,24	3,2	3,2	3,2	3,20
7	0	0	0	2250	20	9	193	193	190	192,1	698	656	722	692,3	3,6	3,4	3,8	3,6	1,9	2,0	2,0	1,95	3,2	3,3	3,1	3,20
8	0	0	0	2250	20	9	196	198	192	195,2	711	668	734	704,5	3,6	3,4	3,8	3,6	1,9	1,9	2,0	1,94	3,2	3,3	3,3	3,26
9	0	0	0	2250	20	9	191	180	192	187,3	695	759	698	717,2	3,6	4,2	3,6	3,8	2,0	2,0	2,1	2,01	3,3	3,2	3,3	3,29
10	0	1	-1	2250	30	6	161	166	165	164,1	632	626	662	640,1	3,9	3,8	4,0	3,9	2,3	2,3	2,3	2,30	3,6	3,6	3,5	3,58
11	0	1	1	2250	30	12	150	155	150	151,2	698	704	692	698,3	4,7	4,6	4,6	4,6	2,4	2,4	2,5	2,44	3,6	3,8	3,6	3,71
12	1	-1	0	3000	10	9	217	215	225	219,0	680	656	686	674,2	3,1	3,1	3,0	3,1	2,3	2,4	2,4	2,37	3,7	3,7	3,6	3,72
13	1	0	-1	3000	20	6	190	195	192	192,1	620	626	590	612,0	3,3	3,2	3,1	3,2	2,3	2,3	2,4	2,33	3,6	3,7	3,8	3,74
14	1	0	1	3000	20	12	158	156	158	157,4	692	668	674	678,3	4,4	4,3	4,3	4,3	2,4	2,4	2,5	2,44	4,0	4,0	4,0	3,98
15	1	1	0	3000	30	9	178	165	173	171,9	650	614	686	650,2	3,7	3,7	4,0	3,8	2,4	2,4	2,5	2,41	3,9	3,9	4,0	3,95

Таблиця Е.3 – Зведені дані результатів експериментальних досліджень подрібнення зерна ячменя удосконаленим дисковим подрібнювачем

№	x ₉	x ₁₁	x ₁₀	n, об/хв	β, °	z, шт	Q, кг/год				N, Вт				q, кВт·год/т				a, %				λ			
							1	2	3	Сер.	1	2	3	Сер.	1	2	3	Сер.	1	2	3	Сер.	1	2	3	Сер.
1	-1	-1	0	1500	10	9	132	127	128	128,8	803	761	831	798,0	6,1	6,0	6,5	6,2	1,4	1,4	1,5	1,44	3,0	3,0	3,0	3,04
2	-1	0	-1	1500	20	6	114	113	114	114,0	775	775	824	791,1	6,8	6,8	7,2	6,9	1,4	1,5	1,5	1,45	3,2	3,0	3,1	3,10
3	-1	0	1	1500	20	12	107	104	111	107,3	810	782	831	807,4	7,6	7,5	7,5	7,5	1,5	1,5	1,6	1,54	3,0	3,0	3,0	3,03
4	-1	1	0	1500	30	9	112	113	108	111,0	789	775	782	781,8	7,0	6,8	7,3	7,0	1,6	1,6	1,6	1,60	3,1	3,2	3,1	3,18
5	0	-1	-1	2250	10	6	137	137	143	138,8	817	796	831	814,3	6,0	5,8	5,8	5,9	1,7	1,7	1,7	1,71	3,3	3,4	3,3	3,33
6	0	-1	1	2250	10	12	123	131	123	125,8	852	817	845	837,6	6,9	6,2	6,9	6,7	1,8	1,8	1,8	1,80	3,3	3,2	3,3	3,28
7	0	0	0	2250	20	9	129	129	128	128,4	838	838	824	832,9	6,5	6,5	6,5	6,5	1,5	1,6	1,6	1,57	3,3	3,3	3,3	3,30
8	0	0	0	2250	20	9	130	130	124	128,1	849	852	852	850,8	6,5	6,6	6,8	6,6	1,5	1,6	1,6	1,55	3,4	3,2	3,4	3,35
9	0	0	0	2250	20	9	131	129	131	130,3	860	873	866	866,1	6,6	6,8	6,6	6,6	1,5	1,6	1,6	1,58	3,4	3,3	3,3	3,38
10	0	1	-1	2250	30	6	112	112	111	111,7	789	775	796	786,4	7,0	6,9	7,2	7,0	1,8	1,9	1,9	1,86	3,6	3,8	3,7	3,70
11	0	1	1	2250	30	12	104	101	103	102,9	817	796	796	802,7	7,8	7,9	7,7	7,8	2,0	2,0	2,1	2,02	3,8	3,8	3,8	3,82
12	1	-1	0	3000	10	9	150	143	149	147,3	817	852	754	807,4	5,4	5,9	5,1	5,5	1,8	1,9	1,9	1,87	3,9	3,7	3,8	3,82
13	1	0	-1	3000	20	6	125	120	125	123,6	782	810	754	781,8	6,2	6,8	6,0	6,3	1,9	1,9	1,9	1,89	3,8	3,9	3,9	3,84
14	1	0	1	3000	20	12	114	115	110	113,2	810	782	831	807,4	7,1	6,8	7,6	7,1	1,9	2,0	2,0	1,97	4,1	4,1	4,2	4,10
15	1	1	0	3000	30	9	123	127	123	124,3	775	782	754	770,1	6,3	6,2	6,1	6,2	2,0	2,0	2,0	1,99	4,1	4,1	4,1	4,10

Лістинг коду Е.1 – Розрахунок в програмному пакеті Wolfram Cloud рівнянь регресії зерен кукурудзи, пшениці та ячменя подрібнених удосконаленим дисковим подрібнювачем

```

Maize={{-1,-1,0,5.44636679229381},{-1,0,-1,5.63735849915082},{-
1,0,1,5.46068686763359},{-1,1,0,5.68523485475963},{0,-1,-1,5.94461540235951},{0,-
1,1,6.01114406242547},{0,0,0,5.91832067163239},{0,0,0,6.07345217802801},{0,0,0,6.0
9410120258616},{0,1,-1,6.57993428668025},{0,1,1,6.84139153973446},{1,-
1,0,6.99038050025457},{1,0,-
1,7.01371549282043},{1,0,1,7.55149156580064},{1,1,0,7.48234452201323}};

nlMaize=NonlinearModelFit[Maize,a00+a10*x1+a20*x2+a30*x3+a12*x1*x2+a13
*x1*x3+a23*x2*x3+a11*x1^2+a22*x2^2+a33*x3^2,{a00,a10,a20,a30,a12,a13,a23,a11,a
22,a33},{x1,x2,x3}];

Normal[nlMaize]
nlMaize["ParameterTable"]
nlMaize["ANOVATable"]

Wheat={{-1,-1,0,2.94523656854746},{-1,0,-1,3.01907874095195},{-
1,0,1,2.96499016467406},{-1,1,0,3.07680142249874},{0,-1,-1,3.20769248153601},{0,-
1,1,3.20317114070896},{0,0,0,3.2019673141154},{0,0,0,3.25540922615269},{0,0,0,3.29
460520221852},{0,1,-1,3.57529867546439},{0,1,1,3.70711743089225},{1,-
1,0,3.71818132400419},{1,0,-
1,3.74123843374551},{1,0,1,3.9846926211308},{1,1,0,3.94815912424568}};

nlWheat=NonlinearModelFit[Wheat,a00+a10*x1+a20*x2+a30*x3+a12*x1*x2+a13
*x1*x3+a23*x2*x3+a11*x1^2+a22*x2^2+a33*x3^2,{a00,a10,a20,a30,a12,a13,a23,a11,a
22,a33},{x1,x2,x3}];

Normal[nlWheat]
nlWheat["ParameterTable"]
nlWheat["ANOVATable"]

```

```

Barley={ {-1,-1,0,3.03942827670967},{-1,0,-1,3.10340171250745},{-
1,0,1,3.03265005791691},{-1,1,0,3.18440159432762},{0,-1,-1,3.32888874855364},{0,-
1,1,3.2831098385194},{0,0,0,3.29592585607093},{0,0,0,3.35109465377642},{0,0,0,3.38
154779170782},{0,1,-1,3.70353145539696},{0,1,1,3.82111866810163},{1,-
1,0,3.8228947077435},{1,0,-
1,3.84345704585686},{1,0,1,4.09973684165707},{1,1,0,4.10474608837629}};

nlBarley=NonlinearModelFit[Barley,a00+a10*x1+a20*x2+a30*x3+a12*x1*x2+a13
*x1*x3+a23*x2*x3+a11*x1^2+a22*x2^2+a33*x3^2,{a00,a10,a20,a30,a12,a13,a23,a11,a
22,a33},{x1,x2,x3}];

Normal[nlBarley]
nlBarley["ParameterTable"]
nlBarley["ANOVATable"]
Fz[x1_,x2_,x3_]:=6.02862+0.851036 x1+0.221999 x1^2+0.27455 x2+0.150458
x2^2+0.178612 x1 x3+0.165189 x3^2
Fy[x1_,x2_,x3_]:=3.25066+0.423271 x1+0.154137 x2
Fx[x1_,x2_,x3_]:=3.34286+0.438869 x1+0.167435 x2+0.104681 x2^2
dx1=750;
x20=20;
dx2=10;
x30=9;
dx3=3;
FFz[n_,a_,z_]:=Fz[(n-x10)/dx1,(a-x20)/dx2,(z-x30)/dx3];
Expand[FFz[n,a,z]]
FFy[n_,a_,z_]:=Fy[(n-x10)/dx1,(a-x20)/dx2,(z-x30)/dx3];
Expand[FFy[n,a,z]]
FFx[n_,a_,z_]:=Fx[(n-x10)/dx1,(a-x20)/dx2,(z-x30)/dx3];
Expand[FFx[n,a,z]]
Plot3D[{FFz[n,x20,z],FFy[n,x20,z],FFx[n,x20,z]},{n,x10-dx1,x10+dx1},{z,x30-
dx3,x30+dx3},PlotStyle-

```

```

>{Directive[Opacity[0.8],Orange],Directive[Opacity[0.7],Green],Directive[Opacity[0.6],
Magenta]}},
Plot3D[{FFz[n, $\alpha$ ,x30],FFy[n, $\alpha$ ,x30],FFx[n, $\alpha$ ,x30]},{n,x10-dx1,x10+dx1},{ $\alpha$ ,x20-
dx2,x20+dx2},PlotStyle-
>{Directive[Opacity[0.8],Orange],Directive[Opacity[0.7],Green],Directive[Opacity[0.6],
Magenta]}},
Plot3D[{FFz[x10, $\alpha$ ,z],FFy[x10, $\alpha$ ,z],FFx[x10, $\alpha$ ,z]},{ $\alpha$ ,x20-dx2,x20+dx2},{z,x30-
dx3,x30+dx3},PlotStyle-
>{Directive[Opacity[0.8],Orange],Directive[Opacity[0.7],Green],Directive[Opacity[0.6],
Magenta]}

```

Лістинг коду E.2 – Комплексна оцінка результатів експериментальних досліджень удосконаленого дискового подрібнювача

```

qc[n_, $\alpha$ _,z_]:=7.395-0.000692859 n-0.724759 z+0.0000536956 n z+0.0382001
z^2+0.0349674  $\alpha$ ;
ac[n_, $\alpha$ _,z_]:=9.18791+0.00101 n-1.02542 z+0.059537 z^2-0.169208  $\alpha$ +0.00500833  $\alpha$ ^2;
 $\lambda$ c[n_, $\alpha$ _,z_]:=7.50949-0.00029013 n+3.94665*10^-7 n^2-0.401823 z+0.0000793831 n
z+0.0183543 z^2-0.0327282  $\alpha$ +0.00150458  $\alpha$ ^2;

qw[n_, $\alpha$ _,z_]:=4.71328-0.000304735 n-0.363803 z+0.027919 z^2+0.0333196  $\alpha$ ;
aw[n_, $\alpha$ _,z_]:=2.86084+0.000333333 n-0.274167 z+0.0162963 z^2-0.0571668
 $\alpha$ +0.00161667  $\alpha$ ^2;
 $\lambda$ w[n_, $\alpha$ _,z_]:=2.43446+0.000564361 n+0.0154137  $\alpha$ ;

qb[n_, $\alpha$ _,z_]:=8.98664-0.000428784 n-0.878204 z+0.0556007 z^2+0.148695  $\alpha$ -
0.00250749  $\alpha$ ^2;
ab[n_, $\alpha$ _,z_]:=2.40709+0.000281667 n-0.250834 z+0.0149074 z^2-0.0505418
 $\alpha$ +0.00146667  $\alpha$ ^2;
 $\lambda$ b[n_, $\alpha$ _,z_]:=2.90007+0.000585159 n-0.0251289  $\alpha$ +0.00104681  $\alpha$ ^2;

```

```

nmin=1500;
nmax= 3000;
 $\alpha$ min=10;
 $\alpha$ max= 30;
zmin=6;
zmax=12;

```

```

Optqc=NMinimize[ { qc[n, $\alpha$ ,z],
  nmin<=n<=nmax, $\alpha$ min<= $\alpha$ <= $\alpha$ max,zmin<=z<=zmax},{n,  $\alpha$ , z} ]
qcMin=First[Optqc];
Optqc=NMaximize[ { qc[n, $\alpha$ ,z],
  nmin<=n<=nmax, $\alpha$ min<= $\alpha$ <= $\alpha$ max,zmin<=z<=zmax},{n,  $\alpha$ , z} ]
qcMax=First[Optqc];

```

```

Optac=NMinimize[ { ac[n, $\alpha$ ,z],
  nmin<=n<=nmax, $\alpha$ min<= $\alpha$ <= $\alpha$ max,zmin<=z<=zmax},{n,  $\alpha$ , z} ]
acMin=First[Optac];
Optac=NMaximize[ { ac[n, $\alpha$ ,z],
  nmin<=n<=nmax, $\alpha$ min<= $\alpha$ <= $\alpha$ max,zmin<=z<=zmax},{n,  $\alpha$ , z} ]
acMax=First[Optac];
Opt $\lambda$ c=NMinimize[ {  $\lambda$ c[n, $\alpha$ ,z],
  nmin<=n<=nmax, $\alpha$ min<= $\alpha$ <= $\alpha$ max,zmin<=z<=zmax},{n,  $\alpha$ , z} ]
 $\lambda$ cMin=First[Opt $\lambda$ c];
Opt $\lambda$ c=NMaximize[ {  $\lambda$ c[n, $\alpha$ ,z],
  nmin<=n<=nmax, $\alpha$ min<= $\alpha$ <= $\alpha$ max,zmin<=z<=zmax},{n,  $\alpha$ , z} ]
 $\lambda$ cMax=First[Opt $\lambda$ c];
Kc [n_, $\alpha$ _,z_] := ( (qc[n, $\alpha$ ,z]-qcMin)/(qcMax-qcMin))*
  ( (ac[n, $\alpha$ ,z]-acMin)/(acMax-acMin));
Opt=NMinimize[ { Kc[n, $\alpha$ ,z], $\lambda$ c[n, $\alpha$ ,z]<9.4, $\lambda$ c[n, $\alpha$ ,z]>7.2,

```

$n_{min} \leq n \leq n_{max}, \alpha_{min} \leq \alpha \leq \alpha_{max}, z_{min} \leq z \leq z_{max}\}, \{n, \alpha, z\}]$

$n_{opt} = n /. Last[Opt];$

$\alpha_{opt} = \alpha /. Last[Opt];$

$z_{opt} = z /. Last[Opt];$

$qc[n_{opt}, \alpha_{opt}, z_{opt}]$

$ac[n_{opt}, \alpha_{opt}, z_{opt}]$

$\lambda c[n_{opt}, \alpha_{opt}, z_{opt}]$

$Plot3D[\{Kc[n, \alpha, z_{opt}]\}, \{n, n_{min}, n_{max}\}, \{\alpha, \alpha_{min}, \alpha_{max}\}, AxesLabel \rightarrow \{ "n", "$
 $\alpha", "K" \}, LabelStyle \rightarrow Directive[FontSize \rightarrow 14, FontFamily \rightarrow "Times", PlotLegends \rightarrow$
 $"Expressions"], Mesh \rightarrow 30, PlotStyle \rightarrow \{Gray\}]$

$Plot3D[\{Kc[n, \alpha_{opt}, z]\}, \{n, n_{min}, n_{max}\}, \{z, z_{min}, z_{max}\}, AxesLabel \rightarrow \{ "n", "$
 $z", "K" \}, LabelStyle \rightarrow Directive[FontSize \rightarrow 14, FontFamily \rightarrow "Times", PlotLegends \rightarrow$
 $"Expressions"], Mesh \rightarrow 30, PlotStyle \rightarrow \{Gray\}]$

$Plot3D[\{Kc[n_{opt}, \alpha, z]\}, \{\alpha, \alpha_{min}, \alpha_{max}\}, \{z, z_{min}, z_{max}\}, AxesLabel \rightarrow \{ "\alpha", "$
 $z", "K" \}, LabelStyle \rightarrow Directive[FontSize \rightarrow 14, FontFamily \rightarrow "Times", PlotLegends \rightarrow$
 $"Expressions"], Mesh \rightarrow 30, PlotStyle \rightarrow \{Gray\}]$

Додаток Ж. Акти впровадження



ЗАТВЕРДЖУЮ

Проректор з наукової та інноваційної діяльності
Дніпровського державного аграрно-економічного
університету д.с-г. н., проф.

Юрій ТКАЛІЧ

Юрій Ткалич 2024 р.



ЗАТВЕРДЖУЮ

Фермерського господарства

"Моніка"

Віталій МОНЯ

Віталій Мона 2024 р.

АКТ

про виробничі випробування дискового подрібнювача концентрованих кормів

Ми, що нижче підписалися, представники Дніпровського державного аграрно-економічного університету (ДДАЕУ), здобувач третього «освітньо-наукового» рівня вищої освіти ОНП «Галузеве машинобудування» Білоус Ілля Михайлович, науковий керівник, завідувач кафедри інжинірингу технічних систем ДДАЕУ, канд. техн. наук, доц. Дудін Володимир Юрійович, з однієї сторони, і представник Фермерського господарства «Моніка» (ЄДРПОУ 37901619, Україна, 51040, Дніпропетровська обл., Дніпровський р-н, село Могилів, вул. Староселівська, будинок 51А) директор Мона Віталій Миколайович, з другої сторони, склали цей акт про те, що в умовах Фермерського господарства «Моніка» проводились виробничі випробування дискового подрібнювача концентрованих кормів з обґрунтованими раціональними конструктивно-технологічними параметрами.

В результаті випробування встановлено, що дисковий подрібнювач виконує технологічний процес подрібнення зерна пшениці з продуктивністю 183-185 кг/год, ячменю – 119-121 кг/год, кукурудзи – 172-176 кг/год при цьому середня споживана потужність складає 734,3 кВт. Середній вміст борошноподібної фракції (частинки діаметром менше 0,2 мм) становив 1,8%, 1,4% та 5,3% відповідно залежно від зернової культури.

Встановлено, що використання дискового подрібнювача концентрованих кормів із обґрунтованими раціональними конструктивно-технологічними параметрами дозволяє виконувати технологічний процес подрібнення концентрованих кормів більш ефективно і якісно.

Даний акт не є підставою для фінансових розрахунків.

Від ДДАЕУ

завідувач кафедри інжинірингу технічних
систем ДДАЕУ, канд. техн. наук, доц.

Володимир Дудін

Володимир ДУДІН

здобувач третього «освітньо-наукового» рівня
вищої освіти ОНП «Галузеве машинобудування»

Ілля Білоус

Ілля БІЛОУС

Від Фермерського господарства «Моніка»

директор Фермерського господарства



Віталій МОНЯ

ЗАТВЕРДЖУЮ

Перший проректор – проректор з навчальної роботи Дніпровського державного аграрно-економічного університету (ДДАЕУ),

канд. с.-г. наук, проф.

Дмитро ОНОПРИЄНКО

«12» вересня 2024 р.

**АКТ**

**про використання результатів дисертації
на здобуття освітньо-наукового ступеня доктора філософії
Білоуса Іллі Михайловича**

**«Обґрунтування конструктивно-технологічних параметрів дискового подрібнювача
концентрованих кормів»
у навчальному процесі кафедри інжинірингу технічних систем ДДАЕУ**

Комісія у складі: голова – декан інженерно-технологічного факультету ДДАЕУ, д-р наук з держ. управ., проф. Пугач А. М. та членів – завідувач кафедри інжинірингу технічних систем ДДАЕУ, канд. техн. наук, доц. Дудін В. Ю., професор кафедри інжинірингу технічних систем ДДАЕУ, канд. техн. наук, доцент, в.о. завідувача кафедри тракторів і сільськогосподарських машин Теслюк Г.В. підтверджує впровадження науково-практичних результатів за дисертаційною роботою на здобуття освітньо-наукового ступеня доктора філософії аспіранта Білоуса Іллі Михайловича «Обґрунтування конструктивно-технологічних параметрів дискового подрібнювача концентрованих кормів» у навчальному процесі кафедри інжинірингу технічних систем ДДАЕУ і констатує

– аспірантом Білоусом І.М. впроваджено в курс дисципліни «Машини і обладнання та їх використання в тваринництві» для студентів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти освітньо-професійної програми «Агроінженерія» спеціальності 208 Агроінженерія наступне: практична робота «Механізація подрібнення концентрованих кормів». Мета роботи – вивчити конструкцію та робочий процес машин для подрібнення концентрованих кормів та методику розрахунку параметрів. Матеріальне забезпечення – дисковий подрібнювач, який удосконалений Білоусом І.М. у відповідності до дисертаційної роботи.

Голова комісії:

декан інженерно-технологічного
факультету ДДАЕУ,
д-р наук з держ. управ., проф.

Андрій ПУГАЧ

Члени комісії:

завідувач кафедри інжинірингу
технічних систем ДДАЕУ,
канд. техн. наук, доц.

Володимир ДУДІН

канд. техн. наук, доцент,
в.о. завідувача кафедри тракторів
і сільськогосподарських машин.

Геннадій ТЕСЛЮК

ЗАТВЕРДЖУЮ

Проректор з наукової та інноваційної діяльності Дніпровського державного аграрно-економічного університету (ДДАЕУ), д-р с.-г. наук, проф.

Юрій ТКАЛІЧ
м.п.

ЗАТВЕРДЖУЮ

Генеральний директор
ТОВ ВО «Восход»

Олена ГУЛА
м.п.


А К Т

**про впровадження/використання результатів
науково-технічної роботи**

Даним актом стверджується, що результати науково-технічної роботи, які виконані здобувачем третього освітньо-наукового рівня вищої освіти ОНП «Галузеве машинобудування» Білоусом Іллею Михайловичем під керівництвом завідувача кафедри інжинірингу технічних систем ДДАЕУ, канд. техн. наук, доц. Дудіна Володимира Юрійовича впроваджені та використані на виробництві ТОВ ВО «Восход» (49098, Україна, місто Дніпро, вул. Любарського, 86). ТОВ ВО «Восход» в особі директора Гули Олени Петрівни отримало конструкторську документацію, конструктивно-технологічну схему дискового подрібнювача концентрованих кормів, який удосконалено згідно дисертаційної роботи на здобуття третього освітньо-наукового ступеня вищої освіти PhD доктор філософії «Обґрунтування конструктивно-технологічних параметрів дискового подрібнювача концентрованих кормів».

Підприємство ТОВ ВО «Восход» зацікавлене у виготовленні дослідної партії дискового подрібнювача концентрованих кормів у кількості 5 одиниць для виробничих випробувань і серійного виробництва.

Підписаний акт не встановлює фінансових зобов'язань між сторонами. Фінансово-правові умови використання науково-технічної продукції обумовлюються двосторонніми договорами.

Від ДДАЕУ

Завідувача кафедри інжинірингу технічних систем ДДАЕУ, канд. техн. наук, доц.

Володимир ДУДІН

Здобувач третього освітньо-наукового рівня вищої освіти ОНП «Галузеве машинобудування»

Ілля БІЛОУС

« 09 » грудня 2024

Від ТОВ ВО «Восход»

Інженер з налагодження й випробування

Владислав ОВДІЄНКО

« 09 » грудня 2024

Додаток II. Результати економічного розрахунку застосування удосконаленого дискового подрібнювача

Таблиця II.1 – Результати економічного розрахунку застосування удосконаленого дискового подрібнювача

№	Показник	Базова конструкція			Удосконалена конструкція		
		Кукурудза	Пшениця	Ячмінь	Кукурудза	Пшениця	Ячмінь
1	Добова потреба в концентрованих кормах по фермі, кг	148,45	110,82	61,98	148,45	110,82	61,98
2	Річна потреба в концентрованих кормах по фермі, кг	54182,43	40447,48	22620,88	54182,43	40447,48	22620,88
3	Продуктивність дискового подрібнювача, кг/год	121	149	75	174	184	120
4	Потужність на привід дискового подрібнювача, кВт	0,582	0,574	0,527	0,722	0,669	0,812
5	Кількість операторів, чол.	1	1	1	1	1	1
6	Час роботи обладнання в протягом доби, год	1,23	0,74	0,83	0,85	0,60	0,52
7	Вартість дискового подрібнювача, грн.	15800,00			18600,00		
8	Витрати праці, люд-год.	447,80	271,46	303,47	311,44	219,47	188,32
9	Споживання електроенергії, кВт·год.	260,62	155,72	159,93	224,86	146,82	152,92
10	Витрати на заробітну платню, грн.	21494,22	13030,06	14566,64	14948,95	10534,48	9039,44
11	Витрати на електроенергію, грн.	1125,87	672,72	690,90	971,38	634,28	660,60
12	Амортизаційні відрахування, грн.	1264,00			1504,00		
13	Відрахування на ремонт і ТО, грн.	951,81			1132,53		
14	Загальні операційні витрати, грн	53796,22			39425,66		
15	Питомі операційні витрати, грн/кг	0,46			0,34		
16	Інвестиції в переобладнання, грн	–			3000,00		
17	Річний економічний ефект, грн	–			14370,56		
18	Питомий річний економічний ефект, грн/кг	–			0,12		
19	Строк окупності інвестицій у переобладнання подрібнювача, років	–			0,21		

Додаток К. Список публікацій здобувача

Статті у наукових виданнях, включених до переліку наукових фахових видань України зі спеціальності 133 Галузеве машинобудування:

1. Дудін, В. Ю., & Білоус, І. М. (2023). Експериментальні дослідження дискового подрібнювача зерна. *Техніка, енергетика, транспорт АПК*, 4(123), 71–77. <http://dx.doi.org/10.37128/2520-6168-2023-4-8> (Здобувачу належить проведення експериментальних досліджень і статистична обробка отриманих даних)

2. Дудін, В. Ю., & Білоус, І. М. (2024). Дослідження процесу руйнування зерна кукурудзи з використанням цифрових моделей. *Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки*, 10(41), II, 123–130. [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2024.10\(41\).2.123-130](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2024.10(41).2.123-130) (Здобувачу належить проведення чисельного моделювання і статистична обробка отриманих даних)

3. Дудін, В. & Білоус, І. (2025). Дослідження ефективності роботи дискового подрібнювача зерна. *Вібрації в техніці та технологіях*, 1(116), 56–63. <https://doi.org/10.37128/2306-8744-2025-1-7> (Здобувачу належить проведення лабораторних досліджень і статистична обробка отриманих даних)

Заявка на патент України на корисну модель:

4. Дудін, В. & Білоус, І. (2025). Заявка на патент України на корисну модель u202501193. Подрібнювач концентрованих кормів. Заявник: Дудін В., Білоус І., Заявл. 20.03.2025. <https://sis.nipo.gov.ua/uk/search/detail/1847229/> (Здобувачу належить розробка конструктивної схеми і опис установки)

Тези і матеріали конференцій:

5. Білоус, І. М. (2022). Обґрунтування доцільності підвищення ефективності подрібнення концентрованих кормів. *Матеріали XXI Міжнародної науково-технічної*

конференції «Технічний прогрес у тваринництві та кормовиробництві» (с. 9–11). ІМА АПВ НААН України. <https://imaap.org.ua/info/attach.php?id=817>

6. Дудін, В. Ю., & Білоус, І. М. (2023). Стенд для проведення експериментальних досліджень дискового подрібнювача зерна. *Матеріали VI Всеукраїнської науково-практичної інтернет-конференції «Проблеми та перспективи розвитку сільськогосподарського машинобудування»* (с. 54–56). ПДАУ. <https://surl.li/wlmlrk> (Здобувачу належить розробка стенду для проведення експериментальних досліджень)

7. Дудін, В. Ю., & Білоус, І. М. (2024). Дослідження міцності зерна кукурудзи з використанням чисельного моделювання методом дискретних елементів (DEM). *Збірник тез доповідей XXV Міжнародної наукової конференції «Сучасні проблеми землеробської механіки»* (с. 191–193). МОН України; НУБіП України. https://nubip.edu.ua/sites/default/files/u349/zbirnik_tez_1.pdf (Здобувачу належить проведення чисельного моделювання і статистична обробка отриманих даних)

8. Дудін, В. Ю., & Білоус, І. М. (2024). Лабораторне обладнання для дослідження процесу визначення зусилля руйнування та деформації зерна. *Збірник тез III Всеукраїнської науково-практичної конференції молодих вчених «Інжиніринг технологій і технічних систем агропромислового комплексу»* (с. 170–172). ДДАЕУ. [https://133phd.dsau.dp.ua/images/doc/conference/2024/Theses_DDAEU\(2024\)_1.pdf](https://133phd.dsau.dp.ua/images/doc/conference/2024/Theses_DDAEU(2024)_1.pdf) (Здобувачу належить розробка лабораторного обладнання для проведення експериментальних досліджень)

9. Білоус, І. М. (2025). Класифікація дискових подрібнювачів. *Збірник тез доповідей Міжнародної науково-практичної конференції «Інновації в агропромисловому комплексі, машинобудуванні та транспорті»* (9–10 квітня 2025 р., Рівне) (с. 8–10). НУВГП. https://drive.google.com/file/d/1yaVhIX2CoJY-hMAXFp3XmDAR4yxPZs_f/view?usp=sharing