

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ЛЬВІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ АГРАРНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ЛЬВІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ АГРАРНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**

*Кваліфікаційна наукова праця  
на правах рукопису*

**ШЕРЕМЕТА РОМАН БОГДАНОВИЧ**

УДК 631.363.21

## **ДИСЕРТАЦІЯ**

### **ОБҐРУНТУВАННЯ ПАРАМЕТРІВ ТА РЕЖИМІВ РОБОТИ МАЛОГАБАРИТНОЇ ЗЕРНОВОЇ ДРОБАРКИ**

05.05.11 – машини і засоби механізації сільськогосподарського виробництва

Подається на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело  
\_\_\_\_\_ Р.Б. Шеремета

Науковий керівник:  
Кузьмінський Роман Данилович,  
доктор технічних наук, доцент

**ЛЬВІВ – 2021**

## АНОТАЦІЯ

Шеремета Р.Б. Обґрунтування параметрів та режимів роботи малогабаритної зернової дробарки. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.05.11 «Машини і засоби механізації сільськогосподарського виробництва». – Львівський національний аграрний університет Міністерства освіти і науки України, Львів, 2021.

Дисертацію присвячено теоретичному та експериментальному дослідженню процесу подрібнення зернового матеріалу в малогабаритній молотковій дробарці комбінованої дії, в якій вдосконалені робочі органи для зниження питомої енергоємності шляхом інтенсифікації процесу подрібнення зернового матеріалу. Малогабаритна молоткова дробарка оснащена молотками зі змінною шириною робочої зони і додатковими робочими органами – пластинами у формі сектора кільця для додаткового способу подрібнення за допомогою перетирання зерна в зоні заклинювання між бічною поверхнею молотка і пластиною.

Об'єктом дослідження є зерновий матеріал, малогабаритна зернова дробарка та технологічний процес подрібнення зерна.

У дисертаційній роботі проведено аналіз досліджень щодо геометричних та фізико-механічних властивостей зерна пшениці, а також характеру їх зміни зі зростанням відносної вологості й сортових відмінностей зерна. Виявлено вплив на коефіцієнт тертя ковзання зерна шорсткості та матеріалу поверхні ковзання і відносної вологості зерна.

Здійснено аналіз стандартів і зоотехнічних вимог, що ставляться до гранулометричного складу продуктів подрібнення, які використовуються у приготуванні кормів для сільськогосподарських тварин. Встановлено, що вміст надмірно подрібненої фракції – менше 0,2 мм – не повинен перевищувати 5 %, а

для фракції понад 3 мм – не більше ніж 5–12 % для сільськогосподарських тварин різного виду, групи та віку.

Проаналізовано теорії подрібнення, існуючі способи руйнування твердих тіл і схеми дробарок, у яких для подрібнення може застосовуватися один або комбінація декількох способів руйнування. Для виробництва кормів зерно в основному подрібнюється дробарками ударної дії – молотковими або роторними.

Проведено огляд конструкцій дробарок ударної дії та їхніх робочих органів, зокрема молотків і решіт, та їх вплив на продуктивність і енергоємність процесу подрібнення. Залежно від властивостей подрібнюваного матеріалу кількість і форма молотків можуть відрізнятися. Завдяки розміру й формі отворів решета, а також куту охоплення ротора решетом можна регулювати продуктивність дробарки і ступінь подрібнення. Зокрема, збільшення кута охоплення до  $360^\circ$  підвищує пропускну здатність на 20–46 % і знижує енергоємність до 19 %. В основному молотки виготовляють із пружинної сталі 65Г, термічно обробленої хромонікелевої легованої сталі або вуглецевої 60Г з підвищеним вмістом марганцю.

Здійснено теоретичні дослідження руйнування зерна пшениці у молотковій дробарці із врахуванням подрібнення перетиранням між боковими поверхнями молотка і пластини. Визначено максимальний кут  $\alpha$  між боковими поверхнями молотка і пластини, за якого відбувається заклинювання і подальше руйнування зерна. Цей кут залежить від коефіцієнта тертя ковзання зерна по поверхні робочих органів і не повинен перевищувати  $33,39^\circ$ .

Визначення максимально можливої кількості зернин, що перебувають у проміжку між молотком і пластиною й піддаються одночасному руйнуванню, здійснено за допомогою програмного середовища MathCAD. Змодельовавши такий процес подрібнення, в якому вхідними величинами були зазор  $k$  між молотком і нерухомо встановленою пластиною, кут  $\alpha$  між їхніми боковими поверхнями, а також інші геометричні параметри молотка і пластини та їх взаємне розташування, побудовано функцію, що відображає кількість

подрібнюваних зерен. Максимальні значення цієї функції 8–9 зернин відповідають зазору 1,5–2 мм та мінімальному куту нахилу бокової грані молотка  $3,5\text{--}4,5^\circ$ .

Розроблено математичну модель процесу подрібнення зерна перетиранням у клиновому зазорі між бічними поверхнями молотка і пластини з врахуванням форми, геометричних і фізичних характеристик зерна і молотка, а також з використанням результатів моделювання його розмірів і конструктивних особливостей робочих органів дробарки.

Описано математичну модель геометричних параметрів зерна пшениці із врахуванням коефіцієнта кореляції між ними.

Час руйнування зерна перетиранням між молотком і пластиною залежить від деформації  $\delta_{pz}$  руйнування зерна, кута  $\alpha$  і частоти обертання ротора  $\omega$  дробарки. Час руйнування зростає зі збільшенням цього кута, проте з перевищенням  $6^\circ$  час зростає повільно, і, враховуючи конструктивні особливості, потрібне збільшення ширини молотка. Оптимальне значення кута  $\alpha$  становить наближено  $6^\circ$ .

Розроблені стенд і лабораторна установка молоткової зернової дробарки для дослідження кількісних показників процесу подрібнення, а саме затраченої потужності й продуктивності дробарки. Стенд забезпечує визначення спожитого струму і напруги електромережі, частоти обертання ротора дробарки та зміни ваги подрібненого продукту в часі. Для збору й передачі даних із давачів на ПК використано плату на мікроконтролері *ATmega328P*. Програмну частину комплексу реалізовано з використанням програмного забезпечення *NI LabVIEW 2019*. Це дозволило відобразити, записати та проаналізувати миттєві значення зміни досліджуваних параметрів, а також математично обробити й проаналізувати отримані результати в реальному масштабі часу.

Розроблена лабораторна установка молоткової зернової дробарки комбінованої дії дозволила встановлювати в корпусі дробарки пластини у формі сектора кільця, швидко змінювати їх для зміни зазору між боковими поверхнями пластин і молотків.

Гранулометричний склад подрібненого зерна досліджували на сучасному високоточному обладнанні методом цифрової обробки зображень.

Експериментально досліджено коефіцієнт тертя зерен пшениці по різних тертьових поверхнях, силу руйнування зерен залежно від їх сорту та відносної вологості. Встановлено, що коефіцієнт тертя зерен пшениці сорту Смуглянка зростає в межах 0,33–0,38 за умови збільшення шорсткості сталеві поверхні від  $Ra = 1,25$  мкм до  $Ra = 12,5$  мкм. Підвищення відносної вологості зерен в інтервалі 12,5–22,7 % призводить до зростання вказаного показника від 0,29 до 0,37 для трьох просторових розташувань зерен відносно напрямку переміщення. Встановлено, що різниця значень коефіцієнтів тертя ковзання по сталевій поверхні для трьох досліджених сортів пшениці Смуглянка, Зимоярка і Золотоколоса є статистично значущою і лежить у межах 0,28–0,36. Дослідження механічних властивостей зерен пшениці свідчать, що сила руйнування зернини залежить від її вологості й розмірів та знаходиться в межах 70–130 Н, а середнє значення цієї сили становить 100 Н. Деформація руйнування зернини пшениці коливається в діапазоні 0,34–0,6 мм, а середнє її значення становить 0,46 мм.

У результаті проведення багатофакторного експерименту обґрунтовано оптимальні параметри та режими роботи малогабаритної зернової дробарки. Для забезпечення зростання продуктивності та мінімальної питомої енергоємності удосконаленої дробарки, що становить 7,91 кВт·год/т, і модуля подрібнення 1 мм необхідна частота обертання ротора становить 3000 об./хв, зазор між молотком і пластиною – 2 мм, а кут між ними –  $6,7^\circ$ . За зростання частоти обертання ротора до 3500 об./хв в разі мінімального зазору 1 мм спостерігається зменшення модуля подрібнення до 0,9 мм, вміст надмірно подрібненої фракції зростає до 8 %, а питома енергоємність збільшується до 8,8 кВт·год/т.

У разі встановлених оптимальних параметрів і режимів роботи дробарки показники якості подрібнення становлять: модуль подрібнення – 1,1 мм, середньоквадратичне відхилення розмірів подрібненого зерна пшениці – 0,63 мм, а варіація – 56,96 %. Частка надмірно подрібненого зерна розміром менше

ніж 0,212 мм становить 4,9 % за допустимих 5 %. Вміст частинок розміром понад 3 мм становить 0,3 % і не перевищує допустимих значень (5–12 %).

Показники економічної ефективності вдосконаленої малогабаритної зернової дробарки визначали порівняно зі серійною дробаркою “Беларусь БКИ-3500”. Встановлено, що експлуатаційні витрати на подрібнення 1 т зернового матеріалу зменшуються на 10,93 %, або на 24,74 грн/т, і становлять 201,6 грн/т. Річний економічний ефект від використання запропонованої малогабаритної зернової дробарки становитиме 3181,57 грн, або 26,51 грн/т, а термін її окупності – 1,32 року.

Отримано три патенти України на корисні моделі, а також патент на винахід.

Результати дисертаційної роботи використовуються в навчальному процесі Львівського національного аграрного університету для підготовки студентів ОКР «бакалавр» і «магістр» спеціальностей 133 “Галузеве машинобудування” та 208 “Агроінженерія”, виконання курсових проєктів і дипломних робіт. Матеріали завершених наукових досліджень впроваджено у машинобудівному підприємстві ТОВ “Арієс Україна”, ТОВ “Крупецький комбікормовий завод” Радивилівського району Рівненської області.

**Ключові слова:** зерно пшениці, фізико-механічні властивості, молоткова дробарка, молоток, подрібнення, питома енергоємність.

## ABSTRACT

Sheremeta R.B. Substantiation of Parameters and Modes of Small-Size Grain Crusher. – Qualificative research paper as a manuscript.

The thesis for the Degree of Candidate of Technical Sciences in the specialty 05.05.11 “Machines and Means of Mechanization of Agricultural Production”. – Lviv National Agrarian University of the Ministry of Education and Science of Ukraine, Lviv, 2021.

The thesis reveals theoretical and experimental research of the process of crushing grain in a small-size hammer crusher of composite action, in which one has improved the working bodies to reduce the specific energy consumption by intensifying the process of crushing grain material. The small-size hammer crusher is equipped with hammers with variable width of the working area and additional working bodies – plates in the form of a ring sector for another method of crushing by rubbing the grain in the jamming zone between the hammer side surface and the plate.

The research object is grain, the small-size grain crusher, and technological process of grain crushing.

In the thesis, one has conducted the analysis of researches concerning geometrical as well as physical and mechanical properties of wheat grain, and character of their change with the growth of relative humidity and varietal differences of grain. The effect on the coefficient of sliding friction of the grain roughness and the material of the sliding surface and the relative moisture content of the grain has been revealed.

The analysis of standards and zootechnical requirements for the particle-size distribution of products of crushing used in the preparation of fodder for farm animals has been carried out. It is established that the content of excessively crushed fraction – less than 0.2 mm should not exceed 5%, and for the fraction more than 3 mm – not more than 5-12% for farm animals of different species, groups, and ages.

One has analyzed theories of crushing, existing methods of destruction of solids and schemes of crushers in which one or a combination of several destruction methods

can be used for crushing. Grain is mainly crushed using such impact crushers as hammer or rotary ones for the production of fodder.

One has provided a review of the structures of impact crushers and their working bodies, in particular hammers, sieves, and their effect on the productivity and specific energy consumption of the crushing process. The number and shape of hammers may differ depending on the properties of the crushed material. Due to the size and shape of the sieve holes, as well as the angle of coverage of the rotor sieve, one can adjust the performance of the crusher and the degree of crushing. In particular, increasing the coverage angle to  $360^\circ$  raises throughput by 20–46% and reduces specific energy consumption up to 19%. The hammers are mainly made of 65G spring steel, heat-treated chromium-nickel alloy steel or 60G carbon one with high manganese content.

Theoretical researches of the destruction of wheat grain in the hammer crusher taking into account crushing by rubbing between side surfaces of the hammer and the plate have been carried out. The maximum angle  $\alpha$  between the side surfaces of the hammer and the plate, at which jamming and subsequent grain destruction occur, has been determined. This angle depends on the coefficient of sliding friction of the grain on the surface of the working bodies. It should not exceed  $33.39^\circ$ .

One has determined the maximum possible number of grains in the gap between the hammer and the plate and can be exposed to simultaneous destruction using the MathCAD software environment. Having done the model of such a crushing process, in which the input values – the gap  $k$  between the hammer and the fixed plate, angle  $\alpha$  between their side surfaces, as well as other geometric parameters of the hammer and the plate and their relative position, one has created a function reflecting the number of crushed grains. The maximum values of this function are 8-9 grains, corresponding to a gap of 1.5–2 mm and a minimum angle of inclination of the side edge of the hammer of  $3.5\text{--}4.5^\circ$ .

A mathematical model of the grain crushing process by rubbing in a wedge gap between the side surfaces of the hammer and plate taking into consideration the shape, geometric and physical characteristics of the grain and the hammer, as well as using the results of modeling of its sizes and design features of the crusher working bodies.



A mathematical model of geometric parameters of wheat grain has been described, considering the correlation coefficient between them.

The time of grain destruction by rubbing between the hammer and the plate depends on the deformation of grain destruction  $\delta_{gd}$ , the angle  $\alpha$  and rotor speed  $\omega$  of the crusher. The destruction time increases while increasing this angle, but with exceeding  $6^\circ$ , the time increases slowly, and, considering the design features, requires an increase of the hammer width. The optimal value of the angle  $\alpha$  is approximately  $6^\circ$ .

The stand and laboratory installation of the hammer grain crusher for research of quantitative indicators of the crushing process, namely the consumed power and productivity of the crusher have been developed. The stand provides the determination of the consumed current and voltage of the electric network, rotor speed of the crusher and change of weight of the crushed product in time. The board on the *ATmega328P* microcontroller has been used to collect and transfer data from the sensors to the personal computer. The software part of the complex has been implemented using the software *NI LabVIEW 2019*. It allowed displaying, recording, and analyzing the instantaneous values of changes in the researched parameters, as well as mathematically processing and analyzing the results in real time.

The developed laboratory installation of the hammer grain crusher of the composite action allowed establishing plates in the form of a sector of a ring in the shell of the crusher, to alter them quickly for change of a gap between side surfaces of plates and hammers.

The particle-size distribution of crushed grain has been studied on modern high-precision equipment applying digital image processing.

The coefficient of friction of wheat grains on different friction surfaces, the force of grain destruction depending on their grade and relative humidity have been studied experimentally. It has been established that the coefficient of friction of wheat grains of the Smuglyanka variety increases from 0.33–0.38 due to increasing the roughness of the steel surface from  $Ra = 1.25 \mu\text{m}$  to  $Ra = 12.5 \mu\text{m}$ . An increase in the relative moisture content of grains in the range of 12.5–22.7 % leads to an increase in this

indicator from 0.29 to 0.37 for three spatial locations of grains relative to the direction of movement. It has been revealed that the difference between the values of the coefficients of sliding friction on the steel surface for the three researched varieties of wheat Smuglyanka, Zimoyarka and Zolotokolos is statistically significant and ranges within 0.28–0.36. Studies of the mechanical properties of wheat grains show that the force of grain destruction depends on its moisture and size and is in the range of 70–130 N, and the average value of this force is 100 N. Deformation of wheat grain destruction varies in the range of 0.34–0.6 mm, and its average value is 0.46 mm.

Having conducted a multifactor experiment, the optimal parameters and modes of operation of a small-size grain crusher have been substantiated. To ensure increased productivity and the minimum specific energy consumption of the improved crusher, which is 7.91 kWh/t and the crushing module of 1 mm, the required rotor speed is 3000 rpm, the gap between the hammer and the plate – 2 mm, and the angle between them – 6.7°. When the rotor speed increases to 3500 rpm in the case of a minimum gap of 1 mm, there is a decrease in the crushing modulus to 0.9 mm, the content of excessively crushed fraction increases to 8%, and the specific energy consumption increases to 8.8 kWh/t.

In the case of the established optimal parameters and modes of operation of the crusher, the quality indicators of crushing include crushing module – 1.1 mm, the standard deviation of the size of the crushed wheat grain – 0.63 mm, and variation – 56.96%. The part of the excessively crushed grain of the size, which is smaller than 0.212 mm is 4.9% according to permissible 5%. The content of particles over 3 mm is 0.3% and does not exceed the permissible values (5–12%).

Indicators of economic efficiency of the improved small-size grain crusher have been determined in comparison with crusher “Belarus BKI-3500” of serial production. It has been established that the operating costs for crushing of 1 ton of grain material are reduced by 10.93% or by 24.74 UAH/t and amount to 201.6 UAH/t. The annual economic effect from the use of the proposed small-size grain crusher will be 3181.57 UAH or 26.51 UAH/t, and its payback period – 1.32 years.

One has received three patents of Ukraine for utility models as well as the patent for an invention.

Thesis results are being used in the educational process of Lviv National Agrarian University to prepare students of Educational Qualification Levels “Bachelor” and “Master” in specialties 133 “Industrial Machine Building” and 208 “Agrarian Engineering”, the implementation of course papers and thesis. Materials of the completed scientific studies are introduced in the machine-building enterprise of Limited Liability Company “Arjes Ukraine”, Limited Liability Company “Krupetskyi feed mill” of Radyvyliv district of Rivne region.

***Key words:*** wheat grain, physical and mechanical properties, hammer crusher, hammer, crushing, specific energy consumption.

### *Список публікацій здобувача.*

#### *Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:*

##### *Статті у наукових фахових виданнях*

1. **Шеремета Р. Б.** Встановлення впливу відносної вологості на геометричні параметри насіння зернових культур. *Збірник наукових праць молодих учених, аспірантів та студентів*. Одеса, 2012. Т. 1. С. 141-143.

2. Соколовський О. Р., Кузьмінський Р. Д., **Шеремета Р. Б.** Вплив розташування насінин пшениці і жита відносно напрямку їх переміщення по сталевих і алюмінієвих поверхнях на значення коефіцієнта тертя ковзання. *Рибне господарство України*. Керч, 2013. № 7, спец. вип. С. 20-23 (здобувач дослідив вплив на значення коефіцієнта тертя ковзання розташування насінин пшениці і жита відносно напрямку їх переміщення по сталевих і алюмінієвих поверхнях).

3. Кузьмінський Р. Д., Соколовський О. Р., **Шеремета Р. Б.** Математична модель геометричних параметрів насінин пшениці. *Вісник Львівського національного аграрного університету: агроінженерні дослідження*. 2014. № 18. С. 171-176 (здобувач запропонував математичну модель геометричних параметрів насінин пшениці).

4. Буртак В. В., Кохана Т. М, Гуменюк Р. В., **Шеремета Р. Б.** Модернізація та аналіз роботи дробарок зернових продуктів. *Вісник Львівського національного аграрного університету: агроінженерні дослідження: Агроінженерні дослідження*. 2017. № 21. С. 124-128 (здобувач провів аналіз роботи дробарок зернових продуктів).

5. **Шеремета Р. Б.** Огляд реологічних моделей. *Вісник Львівського національного аграрного університету: агроінженерні дослідження: Агроінженерні дослідження*. 2018. № 22. С. 22-30.

##### *Статті у міжнародних виданнях*

6. Sokolovskiy O., Kuz'minskiy R., **Sheremeta R.** Effect of relativ humidity on the geometrical parameters of the seeds of wheat and rye. MOTROL, Commission of

motorization and energetics in agriculture. Lublin, 2012. Vol. 14, No. 4. P. 64-69 (здобувач дослідив вплив відносної вологості зерен пшениці на їх геометричні параметри).

7. Кузьминский Р. Д., Соколовский О. Р., **Шеремета Р. Б.** Определение корреляционной связи между отдельными геометрическими параметрами зерен различных культур. MOTROL, Commission of motorization and energetics in agriculture. Lublin; Rzeszów, 2015. Vol. 17, No. 4. P. 71-74 (здобувач визначив кореляційний зв'язок між окремими геометричними параметрами зернових культур).

8. Кузьминский Р. Д., **Шеремета Р. Б.** Исследование механических свойств зерен пшеницы при сжатии. MOTROL, Commission of motorization and energetics in agriculture. Lublin: Rzeszów, 2016. Vol. 18, No. 5. P. 41-45 (здобувач дослідив механічні властивості зерен пшениці).

9. Kuz'minskyj R., Kovalishyn S., Kovalchuk Yu., **Sheremeta R.** Mathematical models of geometric sizes of cereal crops seeds as dependent random variables. *Acta Technologica Agriculturae*. Nitra: Slovaca Universitas Agriculturae Nitriae, 2018. No. 3. P. 101–105 (здобувач описав математичну модель геометричних параметрів зерна пшениці як залежних випадкових величин). (Scopus).

#### ***Матеріали доповідей на наукових конференціях і семінарах***

10. **Шеремета Р. Б.** Дослідження геометричних параметрів насіння пшениці і жита. *Наукові здобутки молоді – вирішенню проблем харчування людства у XXI столітті*: матеріали 78 Міжнар. наук. конф. молодих учених, аспірантів і студентів; 2-3 квіт. 2012 р. Київ: НУХТ, 2012. Ч. 2. С. 93-94.

11. Кузьминский Р. Д., Соколовский О. Р., **Шеремета Р. Б.** Моделювання геометричних параметрів насінин сільськогосподарських культур з використанням багатовимірних розподілів. *Роль науки у підвищенні технологічного рівня і ефективності АПК України*: тези доп. IV Міжнар. наук.-практ. конф., Тернопіль, 15-16 трав. 2014 р. Тернопіль, 2014. С. 91-94 (здобувач запропонував математичну модель геометричних параметрів насінин пшениці).

12. Кузьминский Р. Д., Соколовский О. Р., **Шеремета Р. Б.** Механічні властивості насінин пшениці при стисканні. *Інтеграційна система освіти, науки і виробництва в сучасному інформаційному просторі*: матеріали III Міжнар. наук.-практ. конф., Тернопіль, 19-20 трав. 2016 р. Тернопіль, 2016. С. 120-122 (здобувач здійснив аналіз механічних властивостей зерен пшениці).

13. Kuzminskyj R., **Sheremeta R.** Improvement of construction of small-sized hammer crusher of grain materials. *Agricultural Machinery: VI International Scientific Congress Burgas, Bulgaria, 25.06 – 28.06.2018.* Burgas, 2018. Vol. 1. P. 83-84 (здобувач запропонував удосконалену конструкцію молоткової дробарки).

14. **Sheremeta R.** Mathematical Models of Geometric Sizes of Seeds as Dependent Random Variables. *International Conference on Agriculture, Technology, Engineering and Sciences.* Lviv, 19 to 21 September 2018. Lviv, 2018. P. 75 (здобувач описав математичну модель геометричних параметрів зерна пшениці як залежних випадкових величин).

15. Kuzminskyj R., **Sheremeta R.** Model of the hammer of small-size crusher of grain materials. *Agricultural Machinery: VII International Scientific Congress Burgas, Bulgaria, 26.06 – 29.06.2019.* Burgas, 2019. P. 48-50 (здобувач запропонував модель молотка для комбінованого методу подрібнення у молотковій дробарці).

16. Kuzminskyj R., **Sheremeta R.**, Krupych O., Koruniak P. Model of the impact bar of small-size crusher of grain materials. *International Conference on Agriculture, Technology, Engineering and Sciences (ICATES),* Lviv 18 to 20 September 2019. Lviv, 2019. P. 72 (здобувач запропонував модель молотка для комбінованого методу подрібнення у молотковій дробарці).

### ***Праці, які додатково відображають наукові результати дисертації***

#### ***Патенти на корисну модель***

17. Кузьмінський Р.Д., Соколовський О.Р., **Шеремета Р.Б.** Малогабаритна молоткова дробарка комбінованої дії: пат. 113310 Україна: МПК В02С 13/04 (2006.01). (UA) № U 2016 07011; заявл. 29.06.16; опубл. 25.01.17, Бюл. № 2. 4 с. (здобувач запропонував для інтенсифікації процесу подрібнення в

малогабаритній молотковій дробарці додатково встановити нерухомі пластини у вигляді сектора кільця).

18. Кузьмінський Р.Д., **Шеремета Р.Б.** Малогабаритна молоткова дробарка комбінованої дії: пат. 121453 Україна: МПК В02С 13/04 (2006.01). № U 2017 05035; заявл. 24.05.17; опубл. 11.12.17, Бюл. № 23. 5 с. (здобувач запропонував змінити форму пластин так, щоб зазор між молотком і пластиною зменшувався в радіальному напрямку від осі обертання ротора до внутрішньої поверхні корпусу).

19. Кузьмінський Р.Д., **Шеремета Р.Б.** Малогабаритна молоткова дробарка комбінованої дії: пат. 136298 Україна: МПК В02С 13/04 (2006.01). № U 2019 02296; заявл. 06.03.2019; опубл. 12.08.19, Бюл. № 25. 4 с. (здобувач запропонував змінити форму пластин так, щоб зазор між молотком і пластиною зменшувався по дузі в напрямку обертання молотка).

#### ***Патент на винахід***

20. Кузьмінський Р.Д., **Шеремета Р.Б.** Малогабаритна молоткова дробарка комбінованої дії: пат. 123060 Україна: МПК В02С 13/04 (2006.01). № А 2018 09389; заявл. 17.09.18; опубл. 11.02.21, Бюл. № 6. 4 с. (здобувач запропонував виконати молотки малогабаритної молоткової дробарки комбінованої дії із змінною товщиною, яка збільшується у двох площинах).

## Зміст

ВСТУП .....	19
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕНЬ ЗЕРНОВИХ ДРОБАРОК .....	25
1.1. Зерно як об'єкт дослідження .....	29
1.1.1. Геометричні параметри зерна пшениці.....	30
1.1.2. Фрикційні властивості зерна пшениці .....	31
1.1.3. Механічні властивості зерна пшениці.....	33
1.2. Аналіз існуючих конструкцій дробарок та пропозиції щодо удосконалення схеми подрібнення .....	37
1.2.1. Аналіз конструкцій молотків.....	47
1.2.2. Аналіз конструкцій решіт .....	50
1.3. Аналіз теорій подрібнення зернового матеріалу .....	51
Висновки до розділу 1 .....	57
РОЗДІЛ 2. ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ПОДРІБНЕННЯ НАСІНИН ЗЕРНОВИХ КУЛЬТУР.....	58
2.1. Розробка моделі процесу руйнування зерна .....	58
2.2. Умова защемлення зернини .....	61
2.3. Заповненість зазору між молотком і пластиною .....	64
2.4. Ексцентриситет площі контакту зерна пшениці і площини молотка .....	69
2.5. Контактні напруження .....	74
2.6. Взаємодія зернини з робочими органами дробарки .....	78
Висновки до розділу 2.....	83
РОЗДІЛ 3. ПРОГРАМА І МЕТОДИКА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ.....	84
3.1. Програма експериментальних досліджень .....	84
3.2. Методика дослідження фізико–механічних властивостей зерна...	84
3.2.1. Визначення розмірів зерен пшениці.....	84



	17
3.2.2. Визначення відносної вологості зерен пшениці .....	87
3.2.3. Визначення коефіцієнта форми зерен пшениці .....	88
3.2.4. Дослідження коефіцієнта і зовнішнього кута тертя зерен пшениці .....	89
3.2.5. Дослідження механічних властивостей зерен пшениці .....	92
3.3. Будова та принцип роботи лабораторної установки .....	93
3.4. Стенд для проведення експериментальних досліджень .....	96
3.5. Планування виконання багатофакторного експерименту .....	102
3.6. Вимірювання розміру подрібнених частинок .....	109
Висновки до розділу 3 .....	114
<b>РОЗДІЛ 4. РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ЇХ АНАЛІЗ .....</b>	<b>115</b>
4.1. Вплив матеріалу поверхні ковзання та сортових особливостей зерен пшениці на коефіцієнт тертя ковзання .....	115
4.2. Вплив шорсткості сталевих поверхонь на коефіцієнт тертя ковзання .....	117
4.3. Вплив вологості та просторового розміщення зерен на коефіцієнт тертя ковзання .....	118
4.4. Вплив відносної вологості на геометричні параметри зерен пшениці .....	121
4.5. Механічні властивості зерен пшениці .....	126
4.6. Дослідження оптимальних параметрів багатофакторного експерименту .....	129
4.7. Результати дослідження гранулометричного складу подрібненого зерна .....	141
4.8. Дослідження впливу комбінованого методу подрібнення на його питому енергоємність .....	142
Висновки до розділу 4 .....	145
<b>РОЗДІЛ 5. РОЗРАХУНОК ЕКОНОМІЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ ДРОБАРКИ.</b>	<b>146</b>
5.1. Енергетична ефективність .....	146

5.2. Економічна ефективність .....	147
Висновки до розділу 5 .....	152
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ .....	153
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ .....	156
ДОДАТКИ .....	171
ДОДАТОК А .....	172
ДОДАТОК Б .....	173
ДОДАТОК В .....	175
ДОДАТОК Д .....	176
ДОДАТОК Е .....	177
ДОДАТОК Ж .....	178
ДОДАТОК З .....	179
ДОДАТОК И .....	182
ДОДАТОК К .....	189
ДОДАТОК Л .....	196
ДОДАТОК М .....	201
ДОДАТОК Н .....	207
ДОДАТОК П .....	211

## ВСТУП

**Актуальність теми.** Аграрна галузь є важливою як в Україні, так і в багатьох країнах світу. Сільське господарство найдавніша з галузей матеріального виробництва людства і становить значну частину економіки багатьох країн. Завдяки йому населення забезпечується продуктами харчування, а промисловість – сировиною [1].

Тваринництво охоплює 40 % світової цінності сільськогосподарської продукції та підтримує життєдіяльність і продовольчу безпеку майже 1,3 мільярда людей. Воно є одним із найшвидше зростаючих напрямів сільського господарства. Завдання тваринництва полягає в отриманні таких продуктів, як м'ясо, шерсть, молоко, яйця та ін. Тварин також утримують для спеціальних цілей, наприклад, для отримання вакцин [2], а гній слугує добривом, повертаючи мінерали та органічні речовини до ґрунту в напівзакритій органічній системі [3-6].

В Україні тваринництво становить близько 30 % валової продукції сільського господарства. Протягом останніх декількох років в Україні, зокрема з 2016 року, спостерігається значне зростання кількості яєць, одержаних від свійської птиці, відбувається незначне зростання виробництва м'ясної продукції у живій вазі і практично без змін залишилося виробництво молока [7]. Проте Україна значно поступається іншим країнам світу щодо виробництва м'ясної та молочної продукції на одну людину [8].

Для годівлі тварин як основний компонент або ж як елемент комбінованого корму використовують зерно. Встановлено, що попереднє перероблення зерна на комбікорм дає змогу підвищити його засвоюваність до 30 % [9].

Зараз збільшується частка малих особистих селянських господарств і набуває поширення технологія приготування кормів безпосередньо в господарстві з використанням обладнання для приготування кормів невеликої продуктивності, де недоцільно використовувати високопродуктивні агрегати. Це дозволяє використовувати власну сировину, знизити транспортні витрати і

регулювати склад комбікорму залежно від потреб, а також знизити металомісткість і енергоємність.

Значно впливає на якість комбікорму подрібнення зерна. Це найбільш енергоємна операція, на яку припадає до 70 % затрат енергії в процесі приготування кормів, а продукт подрібнення повинен відповідати зоотехнічним рекомендаціям і вимогам ДСТУ. Мета подрібнення – отримання однорідного за крупністю подрібненого продукту, що підвищує однорідність змішування комбікорму і покращує його засвоюваність тваринами.

Основними машинами для подрібнення в комбікормовій промисловості є молоткова дробарка. Вона має просту конструкцію і не виникає труднощів з її експлуатацією, але в продукті подрібнення підвищений вміст пилоподібної фракції, а також недоподрібнених частинок.

Тому актуальне вдосконалення конструкції і процесу подрібнення в молотковій дробарці для отримання більш однорідного складу продукту подрібнення і зниження енергозатрат процесу.

**Зв'язок роботи з науковими програмами.** Дисертаційну роботу виконано відповідно до тематики науково-дослідних робіт факультету механіки та енергетики Львівського національного аграрного університету «Розробка проектно-керованих інноваційних систем, ресурсощадних технологій і технічних засобів в агропромисловому виробництві та його енергозабезпеченні» (номер державної реєстрації 0116U003179).

**Мета і завдання дослідження.** *Мета дисертаційного дослідження* – підвищення продуктивності та зниження енергоємності малогабаритної зернової дробарки за рахунок удосконалення її конструкції та обґрунтування оптимальних параметрів і режимів процесу подрібнення.

Для досягнення поставленої мети необхідно було розв'язати такі задачі:

- дослідити фізико-механічні властивості зернового матеріалу;
- розглянути принципи реалізації технологічних процесів подрібнення зерна і конструктивні особливості дробарок, проаналізувати теоретичні положення оптимізації їхніх параметрів та режимів роботи;

- розробити математичну модель процесу подрібнення зерна з використанням результатів моделювання його розмірів і конструктивних особливостей робочих органів дробарки;
- провести багатофакторний експеримент та обґрунтувати конструктивно-технологічні параметри експериментального взірця удосконаленої малогабаритної дробарки, перевірити адекватність отриманої математичної моделі процесу подрібнення;
- дослідити робочий процес подрібнення зернового матеріалу і виявити вплив конструктивно-технологічних параметрів запропонованої дробарки на якісні показники подрібненого зернового матеріалу;
- здійснити виробничу перевірку вдосконаленої малогабаритної дробарки та виконати техніко-економічну оцінку впровадження результатів досліджень у виробництво.

*Об'єктом дослідження* є зерновий матеріал, малогабаритна зернова дробарка та технологічний процес подрібнення зерна.

*Предмет дослідження* – закономірності впливу конструктивних параметрів малогабаритної дробарки на енергоефективність процесу подрібнення та якісні показники подрібненого зерна.

**Методи досліджень.** Дослідження процесів подрібнення зернового матеріалу здійснювали на основі теоретичного аналізу та експериментів, виконаних у лабораторних і виробничих умовах з використанням існуючого та розробленого обладнання.

Теоретичні дослідження проводили з використанням основних положень вищої математики, теоретичної механіки і математичного моделювання.

Експериментальні дослідження передбачали застосування методів планування багатофакторного експерименту і регресійного аналізу, результати досліджень обробляли на основі теорії ймовірності та математичної статистики.

Обробку експериментальних даних і теоретичні розрахунки здійснено з використанням сумісних програмних пакетів “*MATLAB 10.1*”, “*Mathcad 14*”, “*Microsoft Excel 2013*”, “*Statistica 10*”, “*NI LabVIEW 2019*”.

**Наукова новизна одержаних результатів** полягає в тому, що:

*вперше:*

- розроблено математичну модель подрібнення зернового матеріалу в малогабаритній дробарці, що дозволяє дослідити процес його руйнування за одночасної дії перетирання та удару;
- досліджено явище защемлення зернини між обертовими робочими органами дробарки та нерухомими пластинами, що дало змогу обґрунтувати конструктивні параметри молотків;

*удосконалено:*

- теорію руйнування зернового матеріалу, яка, на відміну від традиційних, дає змогу врахувати аналітичні функції геометричних розмірів зерен під час обґрунтування конструктивно-технологічних параметрів дробарки;
- теоретичні закономірності сили та роботи руйнування зерен, які дозволяють визначити параметри малогабаритної дробарки;
- методика визначення раціональних конструктивних параметрів робочих органів малогабаритної зернової дробарки для подрібнення зерна пшениці;

*набули подальшого розвитку:*

- дослідження якісних і кількісних показників процесу подрібнення зернового матеріалу;
- наукові засади розроблення енергоефективних малогабаритних зернових дробарок.

Новизна технічних рішень підтверджена патентом України на винахід №123060 та патентами України на корисні моделі №№113310, 121453, 136298.

**Практичне значення одержаних результатів.** На основі проведених досліджень розроблено та виготовлено експериментальний зразок молоткової дробарки, який забезпечує досягнення необхідного ступеня подрібнення зернового матеріалу та зменшує енергоємність процесу.

Отримані за допомогою багатofакторного експерименту регресійні залежності дозволяють оцінити вплив параметрів і режимів роботи малогабаритної дробарки на якісні та кількісні показники процесу подрібнення і можуть бути використані в процесі моделювання машин для його реалізації.

Використання розробленої дробарки дає змогу отримати подрібнений зерновий продукт необхідної якості за гранулометричним складом, що відповідає вимогам ДСТУ 4508:2005 “Комбікорми-концентрати для свиней”, ДСТУ 8406:2015 “Комбікорми для дичини”, ДСТУ 8530:2015 “Комбікорми для великої рогатої худоби”, ДСТУ 8173:2015 “Комбікорми для овець”, а також зоотехнічним вимогам.

Матеріали завершених наукових досліджень впроваджено у машинобудівному підприємстві ТОВ “Арієс Україна”, ТОВ “Крупецький комбікормовий завод” Радивилівського району Рівненської області.

Результати дисертаційної роботи використовуються в навчальному процесі Львівського національного аграрного університету для підготовки студентів ОКР «бакалавр» і «магістр» спеціальностей 133 “Галузеве машинобудування” та 208 “Агроінженерія”, виконання курсових проєктів і дипломних робіт.

**Особистий внесок здобувача.** Основні результати дослідження за темою дисертаційної роботи виконані автором особисто.

У наукових працях, опублікованих у співавторстві, внесок здобувача полягає в тому, що ним: визначено геометричні параметри зерен пшениці за різних значень відносної вологості [1; 6; 10]; досліджено вплив на значення коефіцієнта тертя зерен пшениці матеріалу поверхні та їх просторового розташування відносно напрямку переміщення [2]; розроблено математичну модель геометричних параметрів зерен сільськогосподарських культур [3; 11]; здійснено аналіз роботи дробарок зернових продуктів [4]; здійснено огляд реологічних моделей [5]; встановлено кореляційний зв'язок між геометричними параметрами зерен пшениці [7]; досліджено їхні механічні властивості [8; 12]; створено математичну модель геометричних параметрів зерен як залежних випадкових величин [9; 14]; обґрунтовані окремі параметри малогабаритної

молоткової дробарки комбінованої дії [13; 17–20]; розроблено модель молотка малогабаритної зернової дробарки [15; 16].

У технічних рішеннях, які захищені патентами України на винахід і корисні моделі, частка здобувача становить 40 %.

**Апробація результатів досліджень.** Основні положення і результати роботи заслухані, обговорені та схвалені на Міжнародній науковій конференції молодих учених, аспірантів і студентів “Наукові здобутки молоді – вирішенню проблем харчування людства у XXI столітті” (м. Київ, 2012 р.); IV Міжнародній науково-практичній конференції “Роль науки у підвищенні технологічного рівня і ефективності АПК України” (м. Тернопіль, 2014 р.); Міжнародній науково-практичній конференції “Інтеграційна система освіти, науки і виробництва в сучасному інформаційному просторі” (м. Тернопіль, 2016 р.); International Scientific Congress “Agricultural Machinery” (м. Бургас, Болгарія, 2018–2019 рр.); International Conference on Agriculture, Technology, Engineering and Sciences (м. Львів, 2018–2019 рр.); Міжнародному науково-практичному форумі “Теорія і практика АПК” (м. Львів, 2016–2019 рр.); науково-звітних конференціях здобувачів і аспірантів Львівського НАУ (м. Львів, 2016–2019 рр.).

**Публікації.** За результатами досліджень опубліковано 20 наукових праць, з яких 5 – у фахових наукових виданнях України, 4 – у міжнародних виданнях, з них 1 – у зарубіжних виданнях, що входять до наукометричної бази *Scopus* та 3 – *Index Copernicus*, 7 – у збірниках праць і тез науково-практичних конференцій та форумів, 1 патент України на винахід і 3 патенти України на корисні моделі. Загальний обсяг публікацій становить 5,06 друк. арк.

**Структура та обсяг дисертації.** Дисертація складається зі вступу, п’яти розділів, списку використаних джерел зі 155 найменувань та 13 додатків. Основна частина викладена на 141 сторінці, містить 14 таблиць і 76 рисунків. Повний обсяг роботи з додатками становить 213 сторінок.



## РОЗДІЛ 1

### АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕНЬ ЗЕРНОВИХ ДРОБАРОК

В Україні тваринництво становить близько 30 % валової продукції сільського господарства. Протягом останніх декількох років в Україні, зокрема із 2016 р. спостерігається значне зростання кількості яєць, одержаних від свійської птиці, незначне зростання виробництва м'ясної продукції у живій вазі та практично без змін залишилося виробництво молока (рис. 1.1). Зокрема, у 2019 р. реалізовано на забій сільськогосподарських тварин живою вагою 3477,9 тис. т, з яких 2286,3 тис. т у виробничих підприємствах та 1191,6 тис. т у домашніх господарствах населення, що на 4,8 % більше, ніж у 2018 р. Молока у 2019 р. вироблено 9686,9 тис. т (2717,7 тис. т у підприємствах та 6969,2 тис. т у господарствах населення) порівняно з 10064,0 тис. т у 2018 р., а також випродуковано 16678,1 тис. шт. яєць [7].

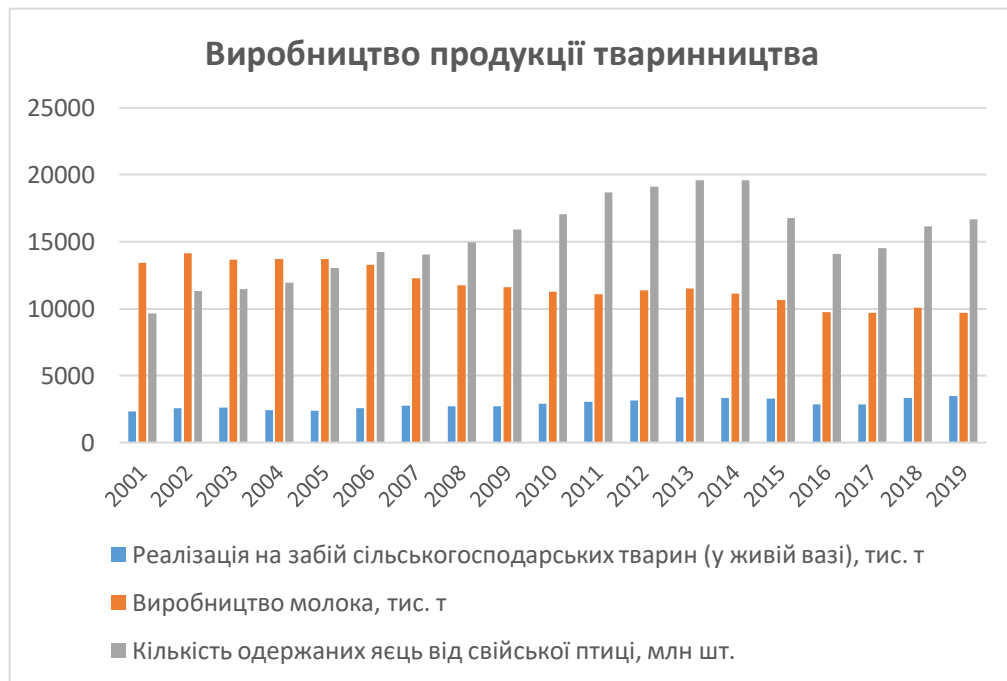


Рисунок 1.1 – Статистичні дані виробництва продукції тваринництва в Україні

Комбікорм – це однорідні суміші очищених, змелених і спеціально підготовлених кормів і кормових джерел, які поєднані за науково

обґрунтованими рецептами і призначені для згодовування окремим видам, виробничим і статевим групам тварин [10].

Для збільшення ефективності використання зернових кормів під час годівлі тварин і птиці застосовують різні способи попередньої підготовки. Серед них широко використовується волого-теплове оброблення (екструдкування, експандування, мікронізація), обрушування плівчастих культур. Такі процеси належать до енергоємних і потребують додаткових капіталовкладень для придбання спеціалізованої техніки. Продукти, отримані в результаті такого оброблення, мають низку властивостей, що забезпечують краще засвоєння поживних речовин, тому їх широко використовують у складі передстартових і стартових комбікормів для молодняку та в раціонах для дорослої птиці [11].

Подрібнення зерна – це один зі способів його попередньої підготовки до згодовування, який забезпечує зміну структури зернівки. Ступінь подрібнення зерна регламентується рецептами комбікормів, тобто залежить, наприклад, від віку і виду птиці [12]. Необхідний ступінь подрібнення зерна вологістю до 14% досягається встановленням у дробарці решіт з отворами діаметром: 3 мм – дрібний помел, 4–5 мм – середній і 6–8 мм – крупний помел [11].

У стандарті на комбікорми (ДСТУ 7693:2015) встановлено три ступені подрібнення, котрі визначаються середнім розміром частинки: від 0,2 до 1 мм – дрібний (застосовують для годівлі свиней), 1–1,8 мм – середній (для годівлі великої рогатої худоби) та 1,8–2,6 мм – крупний помел (для годівлі птиці) [10, 13; 14].

Подрібнення – невід’ємний етап технологічного процесу перероблення сировини у багатьох галузях промислового виробництва, наприклад, у харчовій, хімічній, мінеральній, фармацевтичній, паперовій і енергетичній галузях [15; 16]. Особливо важливу роль воно відіграє в переробленні зерна, вміст якого у кормі для сільськогосподарських тварин і птиці може сягати від 50 до 100 %. Для великої рогатої худоби вміст зерна у складі кормосумішей становить 20–50 %, для свиней – 60–90 %, а для птиці – 80–100 %. Подрібнений матеріал має низку переваг, пов’язаних зі зменшенням розміру частинок, зокрема, руйнування

захисної зернової оболонки, багаторазове збільшення площі контакту з травними ферментами, а також рівномірніше змішування з іншими компонентами кормової суміші [13; 17].

В Україні виготовленням кормів займаються такі підприємства, як ПАТ «Миронівський хлібопродукт», дочірнє підприємство «Оллтек-Україна», корпорація «Єврокорм сучасна годівля», державне підприємство «Івано-Франківський комбінат хлібопродуктів», Ізумрудний сільськогосподарський виробничий кооператив. До продукції цих підприємств, крім виготовлення кормів, можуть входити: зерно, олія, борошно-круп'яна продукція, м'ясомолочні продукти, яйця [18].

На сьогодні в Україні існує понад 120 цехів та заводів для виробництва комбікормів, на які припадає близько 70 % загального обсягу виробництва цих кормоцехів. Кожен із цехів за рік виробляє понад 20 тис. т комбікормів [19].

В аграрному секторі подрібнення широко використовують під час перероблення зернового матеріалу. Подрібнення, розмелювання – це процеси руйнування структури твердих матеріалів під впливом рухомих (зазвичай обертових) робочих органів подрібнювачів [13; 17].

Описати властивості зерна, машини та взаємодії дробарки із подрібнюваним матеріалом важко через складність явищ та процесів, що відбуваються, які пов'язані з масовим потоком. Спроби описати, впорядкувати та пояснити ці зв'язки вчені робили протягом багатьох років [20–26]. Однак моделі, які точно описують процес подрібнення, досі остаточно не розроблені. Труднощі в пошуку адекватних рішень виникають через чинники, до яких належать такі змінні властивості вхідного матеріалу, як механічна міцність матеріалу, його твердість, придатність до подрібнення [27; 28]. Ці властивості матеріалу мають істотний вплив на вибір машини для подрібнення, а також на сам процес подрібнення і його параметри: продуктивність, ефективність, енергоємність [29–31].

Від якості приготування зернових кормів (а саме подрібнення, дозування та змішування) залежить ефективність їх засвоювання тваринами. Подрібнення

– це основна та найбільш енергоємна операція, на яку припадає до 70 % затрат енергії у процесі приготування кормів [32]. Подрібнювати зернові корми необхідно також з огляду на фізіологічні особливості тварин, оскільки швидкість травлення зростає зі збільшенням площі поверхні корму, тому подрібнення кормів пришвидшує процес травлення та покращує засвоєння поживних речовин. Проте, наприклад, для свиней занадто дрібний помел, навпаки, ускладнює роботу шлунка і кишечника, а це, своєю чергою, негативно впливає на засвоєння поживних речовин. Оптимальною крупністю помелу зернових кормів для годівлі свиней є тонкий помел 0,2–1,0 мм. Якщо ж корм подрібнений занадто грубо, то він набагато гірше засвоюється. Для різних видів тварин, а також їхніх вікових груп розміри частинок готового продукту повинні відповідати зоотехнічним вимогам та встановленим стандартам [10; 36–41].

Кінцевою метою подрібнення є отримання однорідного за крупністю та щільністю помелу продукту. Проте зерно неоднорідне, і ендосперм, як більш м'яка його частина, завжди подрібнюється інтенсивніше, тобто дрібніше порівняно з твердішою оболонкою. Під час помелу тритикале, пшениці та кукурудзи, особливо зі зниженою вологістю, кількість мучнистої фракції завжди велика. Неправильно підібране обладнання або неналагодженість технологічного процесу призводить до надмірного подрібнення зерна, що, своєю чергою збільшує енергозатрати на виготовлення комбікорму і погіршує його якість [11].

У зерновій масі, окрім самого зерна основної культури, також можуть міститися різноманітні домішки – як органічні (зерна інших культурних рослин, бур'янів, пошкоджені зерна основної та інших культур), так і мінеральні. Залежно від кількісного та якісного складу цих домішок зернова маса матиме різну цінність і придатність до зберігання та подальшого оброблення.

Для очищеної кормової сировини ступінь забруднення не повинен перевищувати таких норм: земляні домішки – 1–2 %, пісок – 0,2–1 %, зерна отруйних рослин – 0,25 %. Вміст металевих частинок із тупими краями розмірами до 2 мм допускається не більше ніж 30 мг на 1 кг корму [13; 33].

Засміченість зернової маси перевіряють декілька разів – спочатку безпосередньо після збирання врожаю та в подальшому в процесі його оброблення.

### 1.1. Зерно як об'єкт дослідження

Зерно є сировиною багатоцільового призначення, зокрема виробництво борошна та круп засноване на переробленні зерна пшениці, жита, вівса, ячменю та інших зернових культур. Зерно та продукти його перероблення – основні компоненти комбікормів. Хлібобулочні та макаронні вироби, а також крупи забезпечують значну частку потреб людини в енергії, білках та мінеральних речовинах [34].

Зерно являє собою складне органічне тіло, що з'єднує в єдине ціле різноманітні тканини ендосперму, зародка та оболонки (рис. 1.2) [35]. Воно є анізотропним тілом, не тільки через значну різницю структури та хімічного складу анатомічних частин, а й і через істотні відмінності в межах кожної з них.

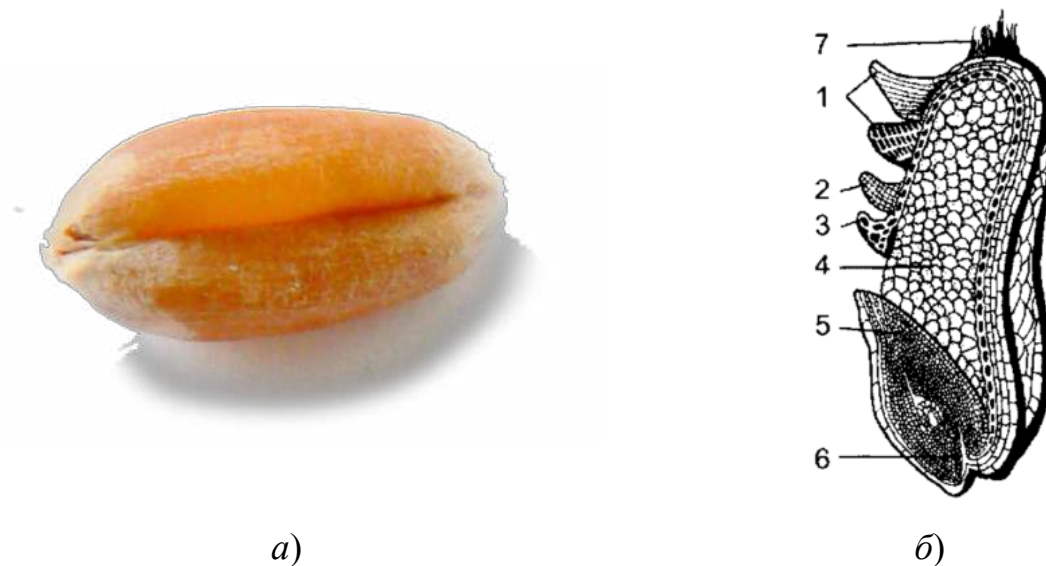


Рисунок 1.2 – Зернівка пшениці: *а)* – загальний вигляд; *б)* – поздовжній переріз:

- 1 – плодова оболонка; 2 – насінна оболонка; 3 – алейроновий шар;  
4 – ендосперм; 5 – щиток; 6 – зародок; 7 – борідка

Зерно – це живий організм, біологічна система, яка впливає на всі процеси, що протікають у зерні на будь-яких етапах його існування.

### 1.1.1. Геометричні параметри зерна пшениці

Геометричні параметри зерна визначають його лінійні розміри, об'єм, площа зовнішньої поверхні зернини, а також форма зерна і показник сферичності.

За формою зернини різних культур помітно відрізняються. Форма кулі характерна для насіння проса, сорго та гороху, а форма тригранної піраміди – для гречки. Сочевиця має практично рівні довжину і ширину та відносно меншу товщину. Для пшениці характерна витягнута форма у вигляді еліпсоїда обертання з борозенкою [34].

Усі геометричні показники коливаються і можуть змінюватися у 2–3 рази. У результаті змінюються об'єм, площа зовнішньої поверхні, а це суттєво впливає на вибір оптимальних параметрів та режимів оброблення сировини. Ефективність технології оброблення буде вищою за мінімальних відхилень геометричних параметрів частинок сипкого матеріалу.

Встановлено, що вологість має суттєвий вплив на фізико-механічні властивості зернових сільськогосподарських матеріалів [43–48; 50; 52–55], також суттєво впливають сортові відмінності [43; 44; 46–48; 51–53; 55]. За результатами більшості дослідницьких робіт прийнято вважати, що геометричні параметри зернового матеріалу багатьох культур лінійно зростають із збільшенням відносної вологості [43; 44, 46–48; 52; 53; 55].

Для зерна введено Б. Н. Кірієвським і А. Т. Кузнецовим поняття коефіцієнта форми  $\xi$ , який використовують у теплових розрахунках. Коефіцієнт  $\xi$  – це відношення площі  $S$  поверхні зернини несферичної форми до площі  $S^*$  поверхні еквівалентної кулі, об'єм якої  $V^*$  дорівнює об'єму несферичної зернини  $V$ . Очевидно, що для кулястих зернин значення коефіцієнта форми  $\xi$  наближається до одиниці.

За критерієм форми зернини пшениці належать до еліптичного типу, а тому їхні геометричні розміри характеризуються трьома параметрами: довжиною  $l$ , шириною  $b$  і товщиною  $h$  (причому вологі зерна крупніші).

Досліджено фізико-механічні властивості зерен пшениці [46–49; 51; 54], зокрема геометричні розміри зерен [48; 51], коефіцієнти зовнішнього та внутрішнього тертя [46–48]. Водночас доцільно зазначити, що в опублікованих роботах містяться переважно середні значення і межі значень параметрів для зерен пшениці та жита різних сортів без визначення характеру розподілу цих випадкових величин.

### 1.1.2. Фрикційні властивості зерна пшениці

Багато робіт присвячено методиці дослідження та розробці спеціальних засобів вимірювання фізико-механічних властивостей сільськогосподарських матеріалів.

Розглянуто деякі властивості матеріалу [49], такі як кут внутрішнього тертя, коефіцієнт тертя зерна і його питома вага, а також враховано додаткові параметри, – коефіцієнт Пуассона і модуль пружності, що описують поведінку матеріалів, які, зазвичай зберігаються в силосах. Ці значення можуть бути використані в процесах моделювання силосу з використанням методу кінцевих елементів для того, щоб краще зрозуміти взаємодію між зерном і структурою силосу.

У дослідженні [51] з метою визначення фізичних і аеродинамічних властивостей були використані окремі сорти пшениці, ячменю, горіхів і сочевиці. При цьому визначали довжину, ширину, товщину, середній геометричний діаметр, сферичність, масу тисячі зерен, щільність, густину, площа поверхні, граничну швидкість витання, коефіцієнт аеродинамічного опору окремої зерен. Середня маса зерен для різних сортів пшениці варіювала від 39,21 до 53,47 мг, а щільність пшениці коливалася від 1373 до 1441 кг/м<sup>3</sup>. Експериментально встановлено, що середня швидкість витання для пшениці лежить у діапазоні від 7,52 до 8,14 м/с.

Робота [56] присвячена визначенню впливу вологості на кут природного укусу, внутрішній коефіцієнт тертя і коефіцієнт тертя поверхонь з алюмінію,

бетону, оцинкованої сталі, деревоволокнистої плити та фанери. Використані зерна квасолі, кукурудзи, арахісу, рису, сої та пшениці за чотирьох ступенів вологості – 10, 15, 20 і 25 %.

Коефіцієнти тертя зерен по різних поверхнях мають тенденцію до збільшення з підвищенням вологості. Коефіцієнт внутрішнього тертя також має аналогічну тенденцію. Оцинкованій сталевій поверхні відповідають нижчі коефіцієнти тертя, в той час як бетонній поверхні притаманні вищі коефіцієнти тертя.

Експериментальні дані були описані многочленом третього ступеня, отримані рівняння мали високі коефіцієнти кореляції для всіх зерен та поверхонь, за винятком взаємодії рису з поверхнями з алюмінію і бетону.

Кут природного укусу збільшується з підвищенням вологості зерен рису, кукурудзи, сої та пшениці. Цей кут для бобів і арахісу також зростає, коли вміст води підвищується, але експериментальні дані були представлені на третьому ступені поліноміальної моделі на тому ж рівні значущості.

Робота [46] присвячена визначенню кута відкосу трьох сортів пшениці *Bani Suwayf 3*, *Giza 168* і *Seds 1* за чотирьох різних рівнів вологості зерна – 9,30; 10,0; 11,11 та 12,5 %. Крім цього, визначено коефіцієнт тертя ковзання зерна за такої ж вологості по чотирьох різних поверхнях, а саме: фанері, оцинкованій сталі, пластмасі й гумі. Згідно з отриманими результатами, кут відкосу зростає лінійно зі збільшенням вологості для всіх сортів пшениці, також зростає й коефіцієнт тертя.

Дослідженням впливу різних матеріалів на коефіцієнт тертя ковзання зерна пшениці доведено, що в разі застосування гуми коефіцієнт тертя для всіх сортів найвищий порівняно з оцинкованим металом, фанерою і пластмасою. Вологість зерна більше впливає на коефіцієнт тертя, ніж матеріали, з якими воно взаємодіє.

В університеті Тегерана [47] було визначено і порівняно ряд фізичних характеристик трьох поширених сортів пшениці *Shiraz*, *Karoun* і *Shiroudy* за вологості 8, 12 і 18 %. Середня довжина, ширина і товщина становили 6,75, 3,26 і 2,77 мм за вологості 8 %; у разі зростання вологості до 18 % маса тисячі зерен



збільшується з 18,38 до 22,43 г. Геометричний і еквівалентний середній діаметри становили 3,93 і 3,94 мм відповідно; площа зовнішньої поверхні – 48,68 мм<sup>2</sup>; показник сферичності – 0,58, а коефіцієнт стиску (за вологості 8 %) – 0,48. Із збільшенням вологості з 8 до 18 % пористість зростає від 0,3 до 0,45 %, тоді як насипна густина зменшилася з 0,72 до 0,66 кг/м<sup>3</sup>, а дійсна густина змінилась з 1,25 до 1,19 кг/м<sup>3</sup>. За аналогічних умов статичний і динамічний кути відкосу зростали з 37,28 до 47,33 і з 29,89 до 36,50; при цьому значення статичних коефіцієнтів ковзання трьох вказаних сортів пшениці зростали лінійно для трьох матеріалів поверхонь, а саме для пластмаси (0,43 – 0,53), для оцинкованого заліза (0,33 – 0,53) і для фанери (0,35 – 0,41).

Різні фізичні властивості п'яти сортів пшениці *Falat*, *Ghods*, *Mahdavei*, *Cross Alborz* і *Saradari* були досліджені [48] для умов зміни вологості від 0 до 22 %. Середня довжина, ширина, товщина і вага тисячі зерен склали відповідно 7,08 мм; 3,27 мм; 2,98 мм і 29,6 г за вологості 7,4 %. Середній геометричний діаметр і сферичність становлять відповідно 4,26 мм і 60 %. Дослідження показали, що насипна і дійсна густина знизилася від 740 до 538,8 кг/м<sup>3</sup> і від 1240 до 847,2 кг/м<sup>3</sup>, у той час як відповідна об'ємна пористість збільшилася. Статичний коефіцієнт тертя по різних поверхнях варіює від 0,279 до 0,450, у той час як динамічний кут природного укосу змінюється від 34,7 ° до 45 ° (за вологості 7,4 %).

### 1.1.3. Механічні властивості зерна пшениці

Структурно-механічні властивості пов'язують структурні особливості (реологію) матеріалу з його реакцією на механічну дію. Основними показниками механічних властивостей зернових матеріалів виступають їх міцність і твердість.

Міцність визначає властивість матеріалу чинити опір подрібненню. Для її оцінювання використовують межу текучості, залежність опору від часу дії навантаження, межу міцності. Межа міцності визначає напруження, вище від якого матеріал руйнується майже миттєво.

У теорії пружності для опису механічних властивостей матеріалу використовують спеціальні величини [34]:

- модуль Юнга

$$E = \sigma / \varepsilon_1; \quad (1.1)$$

- коефіцієнт Пуассона

$$\nu = |\varepsilon_2| / \varepsilon_1; \quad (1.2)$$

- модуль зсуву

$$G = \tau / \gamma; \quad (1.3)$$

- об'ємний модуль пружності

$$K = \sigma / 3\varepsilon, \quad (1.4)$$

де  $\sigma$  – нормальне напруження;

$\tau$  – дотичне напруження;

$\varepsilon_1$  – поздовжня деформація;

$\varepsilon_2$  – поперечна деформація;

$\gamma$  – деформація зсуву.

Між цими модулями існують такі взаємозалежності:

$$G = E / 2(1 + \nu), \quad (1.5)$$

$$K = E / 3(1 - 2\nu). \quad (1.6)$$

Таким чином, тільки  $E$  і  $\nu$  – незалежні величини. Однак усі ці залежності справедливі для ізотропних матеріалів. Для матеріалу з різко вираженою анізотропією структури і властивостей, яким є зерно, у математичному описі необхідно використовувати велику кількість різних модулів. Тому математичне моделювання доволі складне й потребує точного визначення низки параметрів отриманих характеристик за допомогою експериментальних досліджень.

Усі описані вище параметри не є постійними, а змінюються під дією різних чинників, зокрема вологості і температури. Зі збільшенням вологості знижуються пружні та підвищуються пластичні властивості зерна. За низьких температур підвищуються пружні властивості зерна, які з підвищенням температури знижуються. Для більшості матеріалів значення коефіцієнта Пуассона лежить у межах 0,2–0,5, відношення модуля пружності до модуля

зсуву – у межах 2–3, а відношення модулів пружності за об'ємного і одностороннього стиску – 0,3–3,3.

Межа міцності  $[\sigma]$  – напруження, з перевищенням якого матеріал руйнується практично миттєво. Значення  $[\sigma]$  залежить від виду деформації, оскільки опірність розтягуванню, стисненню, зсуву, зрізу, крученню в кожного матеріалу різна.

Зі збільшенням вологості знижуються пружні і збільшуються пластичні властивості зерна. Зі збільшенням вологості підвищується відносна деформація і знижуються межа міцності та умовно-миттєвий модуль пружності (при цьому у різних культур ці зміни різні).

Дослідники Е. Д. Казаков та ін. [57; 58] виявили, що відносна деформація зерна пшениці перебуває в тісному корелятивному зв'язку ( $r = -0,805$ ) із вмістом білка. Це є додатковим свідченням того, що білкові матриці ендосперму забезпечують його жорсткість. Істотний вплив також мають консистенція ендосперму, його склоподібність. Пластичні властивості сильніше виражені в зерні з борошністим ендоспермом, особливо за підвищеної його вологості.

Подрібнення потребує затрат зовнішньої енергії [59] на подолання опору зерна, утворення нових поверхонь і об'ємів, тертя, деформацію і сприяє зношуванню робочих органів подрібнювачів.

За результатами досліджень отримано характерні для зернового матеріалу залежності зусилля стиску  $F$  від деформації  $\delta$  (рис. 1.3) [60; 61].

На інтервалі до точки  $A$  виникають пружні деформації, на інтервалі  $AB$  – пружно-пластичні деформації. У точці  $C$  відбувається руйнування, за якого досягається критичний рівень деформації. Модуль пружності визначається за графіком залежності навантаження від деформації (див. рис. 1.3) [62].

Робота руйнування зерна визначається зі співвідношення [63]:

$$A_{pz} = F_{pz} \delta / 2, \quad (1.7)$$

де  $F_{pz}$  – навантаження, Н;

$\delta$  – деформація, мм.

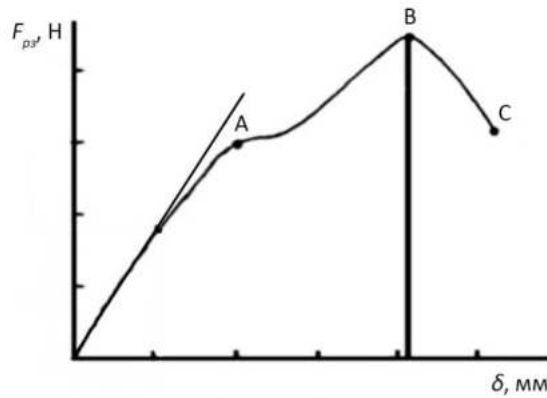


Рисунок 1.3 – Залежність деформації зерна від зусилля стиснення

Визначаючи витрати енергії на подрібнення зерна, враховують структурно-механічні характеристики зерен. Робота руйнування зерна окремо взятого сорту для певної кліматичної зони й умов виконання операцій оброблення та збирання залежить від міцності, твердості й пластичних властивостей зерна.

На сьогодні проведено низку досліджень щодо вивчення механічних властивостей пшениці.

Вплив сортових відмінностей пшениці на її механічні властивості наведено в роботах [64–67]. Встановлено, що з підвищенням вологості пшениці сила руйнування лінійно зменшується, а робота – лінійно зростає [67–69]. Досліджувався вплив орієнтації розміщення зерен пшениці [64; 68] від напрямку вектора сили навантаження. Встановлено, що в разі зміни орієнтації зерен відносно вектора прикладання зусилля – сила руйнування зерен коливається в межах 10–50 %. Також досліджувався вплив швидкості навантаження на значення сили і роботи руйнування зерен. Так, збільшення швидкості навантаження зумовлює зменшення сили і роботи руйнування зерен [68; 70; 71].

Біологічні сільськогосподарські матеріали, зокрема зерна пшениці та інших культур, мають складну багатошарову реологічну структуру, що потребує ґрунтовного її вивчення [72].

Для адекватного опису реологічних властивостей сільськогосподарських матеріалів потрібно використовувати моделі, що складаються з трьох і більше елементів. Проте зі зростанням їх кількості підвищується не тільки точність опису конкретного біологічного матеріалу, а й значно ускладнюється математичний аналіз моделей.

## 1.2. Аналіз існуючих конструкцій дробарок та пропозиції щодо удосконалення схеми подрібнення

Подрібнення твердих тіл здійснюють такими способами: роздавлюванням (плющенням), розколюванням, стиранням, розпилюванням, ударом та різанням (лезом, пуансоном, різцем) [73] (рис. 1.4).

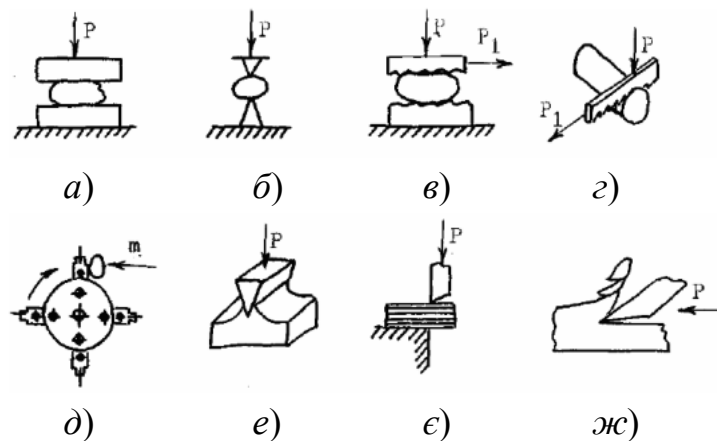


Рисунок 1.4 – Способи подрібнення твердих тіл: *a* – роздавлювання; *б* – розколювання; *в* – стирання; *г* – розпилювання; *д* – удар; *е* – різання лезом; *е* – різання пуансоном; *ж* – різання різцем

Роздавлювання (див. рис. 1.4, *a*) – це руйнування матеріалу під дією деформуючого навантаження, яке призводить до збільшення внутрішнього напруження вище від його межі міцності. Під час розколювання тіло руйнується в місці концентрації навантажень (див. рис. 1.4, *б*). У процесі стирання тіло руйнується під сукупною дією стискальних, розтягувальних та зрізувальних сил (див. рис. 1.4, *в*). У випадку розпилювання (див. рис. 1.4, *г*) і різання (див. рис. 1.4, *е*, *е*, *ж*) тіло ділиться на частинки заданої форми і розмірів. Удар – це

руйнування на частинки під дією динамічного навантаження. Розрізняють вільний (див. рис. 1.4,  $\delta$ ) та стиснений удар, за якого тіло руйнується між двома робочими органами.

Залежно від механіко-технологічних властивостей матеріалу, а також від вимог до кінцевого продукту подрібнення використовують один з вищевказаних (див. рис. 1.4) способів подрібнення. Для тонкого подрібнення в'язких і м'яких матеріалів застосовують стирання, щоб отримати кускові матеріали – розколювання, а для отримання частинок заданого розміру – різання або розпилювання [74].

Під час приготування кормів для подрібнення зерна використовують удар, розколювання, роздавлювання, стирання і різання. Також може використовуватися суміщення декількох способів подрібнення в одній машині [75].

За способом дії на подрібнюваний матеріал подрібнювачі можна розділити на п'ять основних груп: жорнові постави, вальцеві млини, штифтові подрібнювачі (дезінтегратори), відцентрово-роторні подрібнювачі, молоткові дробарки.

Існують такі типи машин для подрібнення, як шокові, конусні, валкові, барабанні, молоткові та роторні дробарки (рис. 1.5). Вибір необхідного типу дробарки визначається властивостями подрібнюваного матеріалу [80].

Конструктивно жорнові постави прості за будовою, але громіздкі, енергоємні та малопродуктивні, викликають надмірний нагрів продукту, в якому переважають пилоподібна і борошниста фракції, що знижують якість корму [76].

До недоліків вальцевих подрібнювачів належить те, що навіть незначні коливання зазору між вальцями призводять до значної зміни ступеня подрібнення, а також навантажень на вальці й витрат електроенергії. Значна частина механічної енергії перетворюється на теплоту і відбувається нагрів як самих вальців, так і продукту переробки [77].

Основним недоліком штифтових подрібнювачів (дезінтеграторів) є підвищене зношування подрібнювальних штифтів [78]. Молоткові дробарки

компактні, надійні в роботі й мають просту конструкцію; до їхніх недоліків можна віднести високу енергоємність, нерівномірність гранулометричного складу продукту подрібнення з підвищеним вмістом дрібної фракції та інтенсивне зношування робочих органів [79].

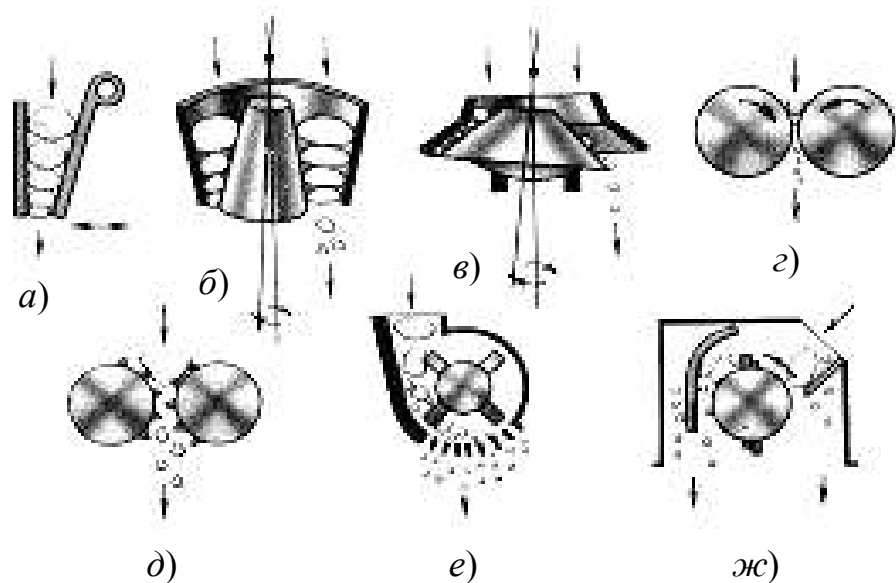


Рисунок 1.5 – Схеми дробарок: *a* – щокова; *б* – конусна крупного подрібнення; *в* – конусна для середнього та дрібного подрібнення; *г* – валкова; *д* – валково-зубчата; *е* – молоткова; *ж* – роторна

Щокові й конусні дробарки переважно використовують на збагачувальних фабриках для подрібнення руд та інших матеріалів з високою твердістю. Щокові дробарки (див. рис. 1.5, *a*) роздавлюють матеріал між двома щоками, одна з яких рухома, а конусні (див. рис. 1.5, *б*, *в*) – між рухомим конусом і корпусом.

Валкові дробарки подрібнюють матеріали валками, які обертаються назустріч один одному або ж валком і нерухомою щокою. За числом валків дробарки можуть бути з одним, двома, трьома і більше валками, поверхня яких може бути гладкою, рифленою, із зубцями або з гумовим покриттям.

Ефективність подрібнення оцінюється ступенем подрібнення, який, своєю чергою, може бути лінійним  $i$  або об'ємним  $a$  та визначається з наступних співвідношень:

$$i = d_n/d_k; \quad (1.8)$$

$$a = i^3 = d_n^3/d_k^3, \quad (1.9)$$

де  $d_n$  – початковий розмір частинок матеріалу, м;

$d_k$  - розмір частинок матеріалу після подрібнення, м.

Під  $d_n$  розуміють середній геометричний розмір, який можна визначити за формулою

$$d_n = \sqrt[3]{l b h}, \quad (1.10)$$

де  $l, b, h$  – відповідно максимальна довжина, ширина і висота частинки, м.

Для приготування кормів в основному використовують дробарки ударної дії роторні (рис. 1.6, *a*) та молоткові (рис. 1.6, *б*). До роторних належать дробарки, в яких робочі органи (била) жорстко закріплені на роторі дробарки. Вони можуть використовуватися для грубого та дрібного подрібнення матеріалів як із низькою, так і з підвищеною міцністю. Недоліком роторних дробарок є швидке зношення робочих елементів, значне пилоутворення і необхідність точного балансування ротора.

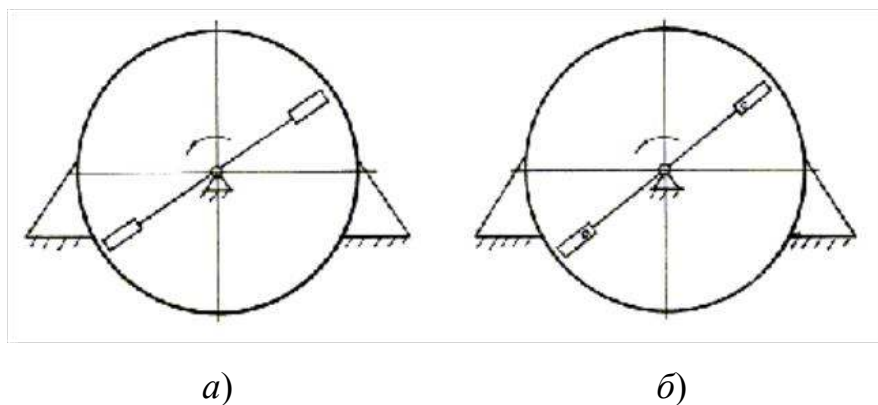


Рисунок 1.6 – Схеми роторних (*a*) та молоткових (*б*) дробарок

У молоткових дробарках подрібнення продукту відбувається в результаті ударів по ньому молотків, а також ударів подрібнюваних частинок об корпус дробарки і просівання крізь сито.

До переваг дробарок ударної дії можна віднести: простоту конструкції, високу надійність роботи, компактність, високу продуктивність, високий ступінь подрібнення (понад 20), високу швидкість робочих органів.

Попри переваги молоткових дробарок, у них також є певні недоліки, а саме: висока енергоємність, нерівномірний гранулометричний склад



подрібненого продукту, високий вміст надмірно подрібнених частинок, інтенсивне зношування робочих органів [13].

Типові молоткові дробарки (рис. 1.7) складаються з корпусу 2, завантажувальної горловини 1 та вивантажувального патрубку 7, змонтованого на валу 3 ротора 4 з шарнірно закріпленими молотками 5 та решето 6. Під час обертання вала 3 з ротором 4 матеріал, що подається в робочу камеру дробарки, піддається багаторазовим ударам молотків 5 і таким чином подрібнюється, після чого вивантажується з дробарки через решето 6.

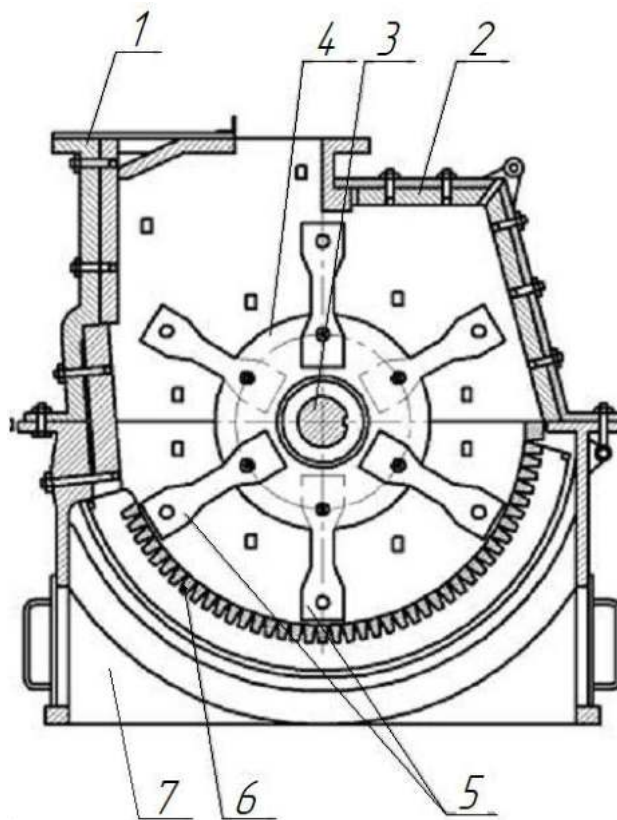


Рисунок 1.7 – Схема молоткової дробарки:

1 – завантажувальна горловина; 2 – корпус дробарки; 3 – вал; 4 – ротор;  
5 – шарнірно закріплені молотки; 6 – решето; 7 – вивантажувальний патрубок

Розроблений типоряд універсальних молоткових дробарок продуктивністю 2-3 т/год, зокрема КДУ-2, ДКУ-М, КДМ-2, КДМ-3 та ДКУ-1 [81]. У подальшому були розроблені модернізовані дробарки ДБ-5, ДМБ-5, ДКМ-5 продуктивністю від 4 до 5 т/год.

Універсальна дробарка кормів КДУ-2 (рис. 1.8) призначена для подрібнення зерна, стебел і качанів кукурудзи та сіна в борошно і дерть, а також зелених кормів, коренебульбоплодів і силосу в мезгу. На ній також можна готувати кормові суміші, до складу яких входять декілька компонентів з введенням додаткових рідин. Дробарка може використовуватися як автономна машина або ж у комплексі з іншим обладнанням для приготування кормів.

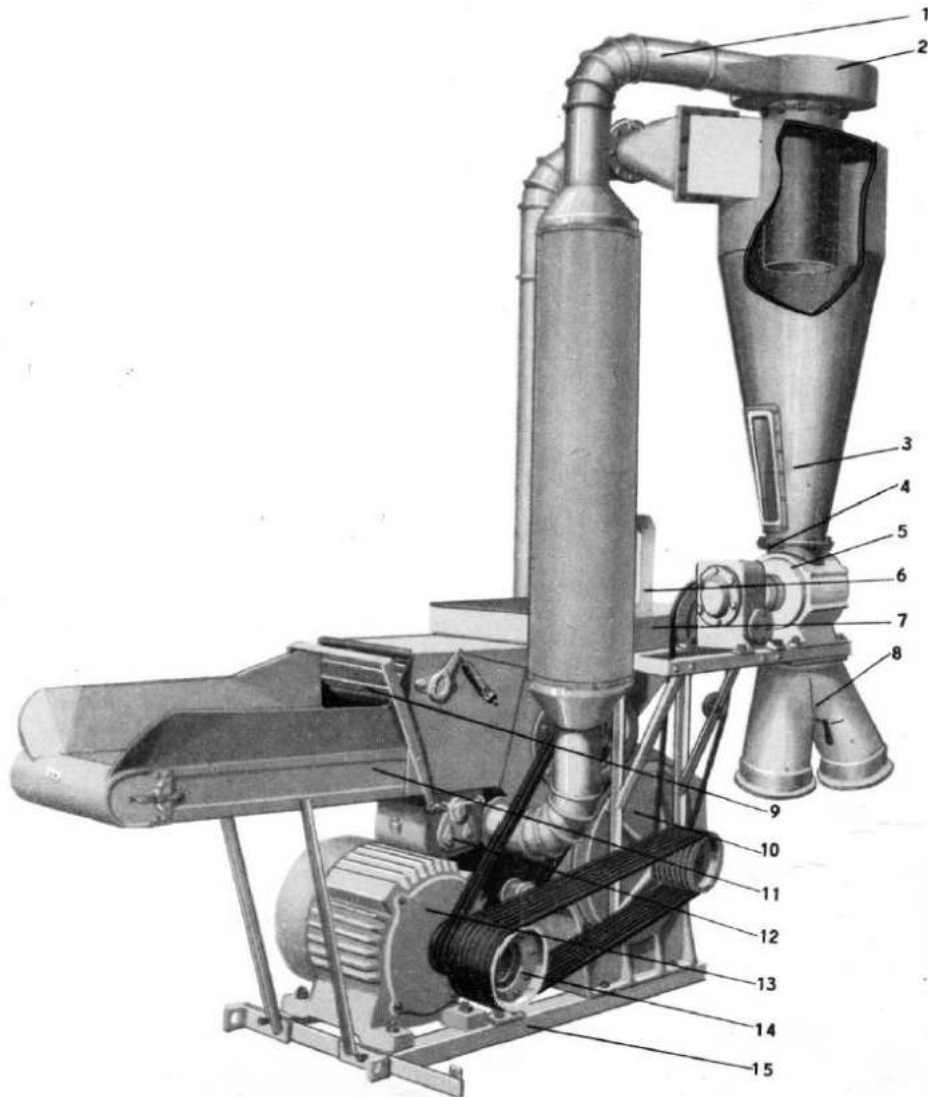


Рисунок 1.8 – Універсальна дробарка кормів КДУ-2:

1 – зворотний трубопровід; 2 – верхня частина циклона; 3 – циклон;  
 4 – редуктор шлюзового затвора; 5 – шлюзовий затвор; 6 – індикаторний  
 амперметр; 7 – завантажувальний бункер; 8 – вивантажувальні рукави;  
 9 – прес-транспортер; 10 – камера подрібнення; 11 – транспортер  
 живильника; 12 – редуктор транспортера; 13 – електродвигун; 14 – шків  
 з автоматичною фрикційною муфтою; 15 – рама дробарки

Продуктивність дробарки під час подрібнення зерна становить 2,0 т/год, для зеленої маси – 3,0 т/год; потужність двигуна – 30 кВт, маса – 940 кг [86].

Дробарка КДУ-2 складається із завантажувального бункера 7, транспортера живильника 11, прес-транспортера 9 і подрібнювальної камери 10. Подрібнений зерновий матеріал за допомогою повітряного потоку потрапляє у верхню частину 2 циклона 3. Повітряний потік, звільнений від подрібненого продукту, повертається в подрібнювальну камеру 10 по зворотному трубопроводу 1. Подрібнений корм вивантажується через рукави 8 і регулюється шлюзовим затвором 5 з редуктором 4. Дробарка змонтована на рамі 15 і приводиться в дію електродвигуном 13 за допомогою шківів пасової передачі з автоматичною фрикційною муфтою 14 і редуктора транспортера 12, а навантаження на двигун відстежується за допомогою індикаторного амперметра 6.

Молоткова дробарка для зерна *RVO 1045* німецького виробництва (рис. 1.9) – це високопродуктивна дробарка зернових кормів. Дробарка змонтована на рамі, а ротор встановлений безпосередньо на валу двигуна потужністю 45 кВт. Продуктивність на подрібненні ячменю становить 5,7 т/год, а пшениці – 11,5 т/год [87].



Рисунок 1.9 – Молоткова дробарка для зерна *RVO 1045*

Дробарки КДУ-2 і *RVO 1045* – це потужні промислові високопродуктивні машини, які використовують для подрібнення великих об’ємів зерна. Зазвичай промислові молоткові дробарки приводяться в дію трифазними електродвигунами потужністю 10–300 кВт, з’єднаними з валами дробарок за допомогою пасових передач або еластичних муфт. Дробарки з двигунами потужністю 40–300 кВт застосовують на сушильних лініях та на промислових комбікормових заводах [89–93].

Виготовлялись також серійні машини для перероблення зерна невеликої продуктивності до 0,5–1 т/год: молоткові зернові дробарки ДЗ–0,1, ДЗ–Т–1 та ДЗТ–П; дробарки для зерна і коренеплодів ДЗК–1 та ИЗК–1 [82, 83].

Зернова дробарка ДЗ-Т-1 (рис. 1.10, а) має просту конструкцію та надійна у роботі. Складається з корпусу 3 із завантажувальним бункером 1, подрібнений матеріал виводиться з дробарки через напірний канал 6 по вивантажувальному патрубку 2. Приводиться в дію дробарка електродвигуном 4 з використанням блоку конденсаторів 7. Ротор дробарки (рис. 1.10, б) завдяки втулці 3 встановлений на валу двигуна, а молотки 1 шарнірно закріплені на пальцях 2.

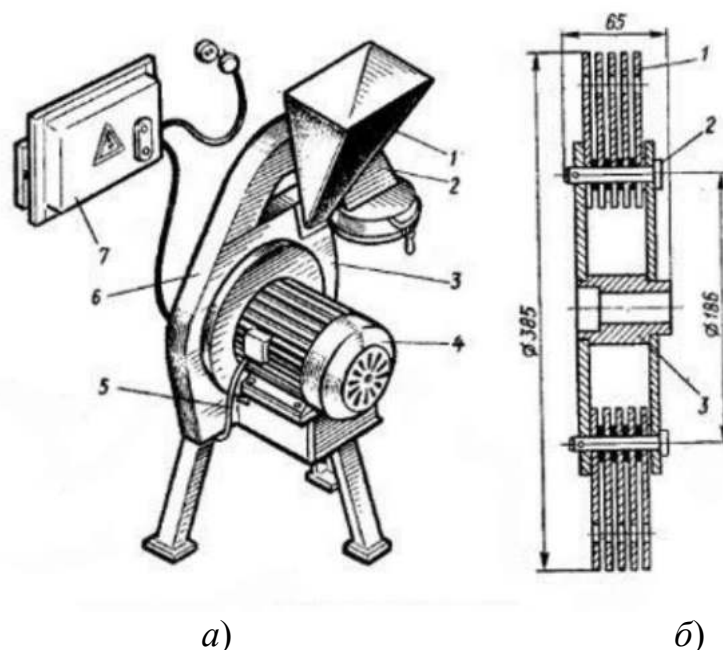


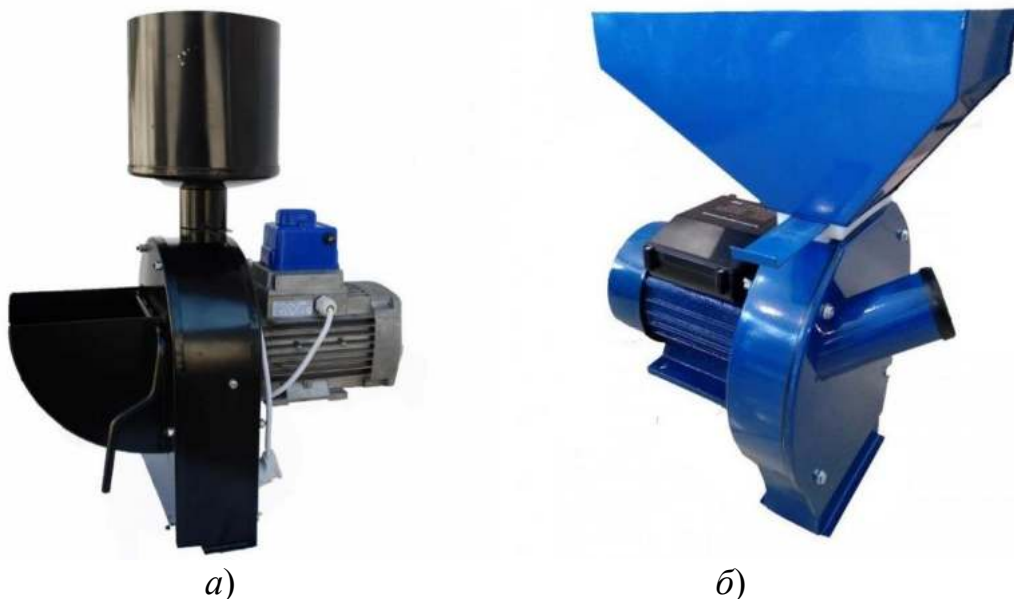
Рисунок 1.10 – Дробарка зернова ДЗ-Т-1: а – загальний вигляд:

1 – завантажувальний бункер; 2 – вивантажувальний патрубок; 3 – корпус;  
4 – електродвигун; 5 – кабель живлення; 6 – напірний канал; 7 – блок конденсаторів; б – ротор дробарки в розрізі: 1 – молоток; 2 – палець; 3 – втулка

До недоліків конструкції можна віднести використання конденсаторного електродвигуна, який не призначений для тривалої роботи та перевантажень, а також може перегріватися.

Вітчизняна промисловість виготовляє серійні подрібнювачі зерна КД-1 і КД-2 – розробник «Мотор Січ», ЗИ-1 – Київський редукторний завод; машина для приготування корму КМП-Т-2 – Уманський дослідний завод сільгоспмашинобудування [84; 85].

Дробарка кормів КД-2 (рис. 1.11, а) продуктивністю 65 – 120 кг/год призначена для крупного помелу зерна злакових та бобових культур і для шаткування коренеплодів. На відміну від моделі КД-1, на валу якої був встановлений шків для пасової передачі, дробарка КД-2 оснащена електродвигуном потужністю 0,75 кВт, що безпосередньо з'єднаний з ротором і обертається з частотою 2800 об./хв [88].



а)  
Рисунок 1.11 – Кормодробарка КД-2 (а),  
зернодробарка “Беларусь БКИ-3500” (б)

Зернодробарка “Беларусь БКИ-3500” (рис. 1.11, б) призначена для подрібнення зерна і качанів кукурудзи, оснащена електродвигуном потужністю 3,5 кВт; продуктивність до 180 кг. Дробарка оснащена решетом, яке охоплює весь периметр ротора, за винятком завантажувальної горловини. Недоліком цієї

дробарки є забивання продуктами подрібнення простору між ситом і боковими стінками, що в результаті значно зменшує площу його робочої поверхні.

Для потреб особистих індивідуальних господарств випускають переважно дробарки невеликої потужності від 0,5 до 2–3 кВт та продуктивністю 40–250 кг/год.

Для вдосконалення процесу подрібнення та конструкції машин проаналізовано багато оригінальних рішень, що дозволило підвищити технічний рівень дробарок, знизити затрати, а також автоматизувати процес перероблення зерна. Удосконалення дробарок передбачає модернізацію робочих органів, форми і розміру отворів у решетах, підвищення однорідності подрібненого матеріалу та зниження енергоємності процесу подрібнення [95–98].

На рис. 1.12 показана типова конструкція ротора молоткової дробарки. На валу ротора 8 змонтовані опорні диски 1 з осями 2, що фіксуються стопорним кільцями 3, на яких шарнірно закріплені молотки 4. Рівномірну відстань між молотками забезпечують дистанційні втулки 5, а між дисками – втулки 6. Передача крутного моменту від вала до ротора забезпечується шпонкою 7.

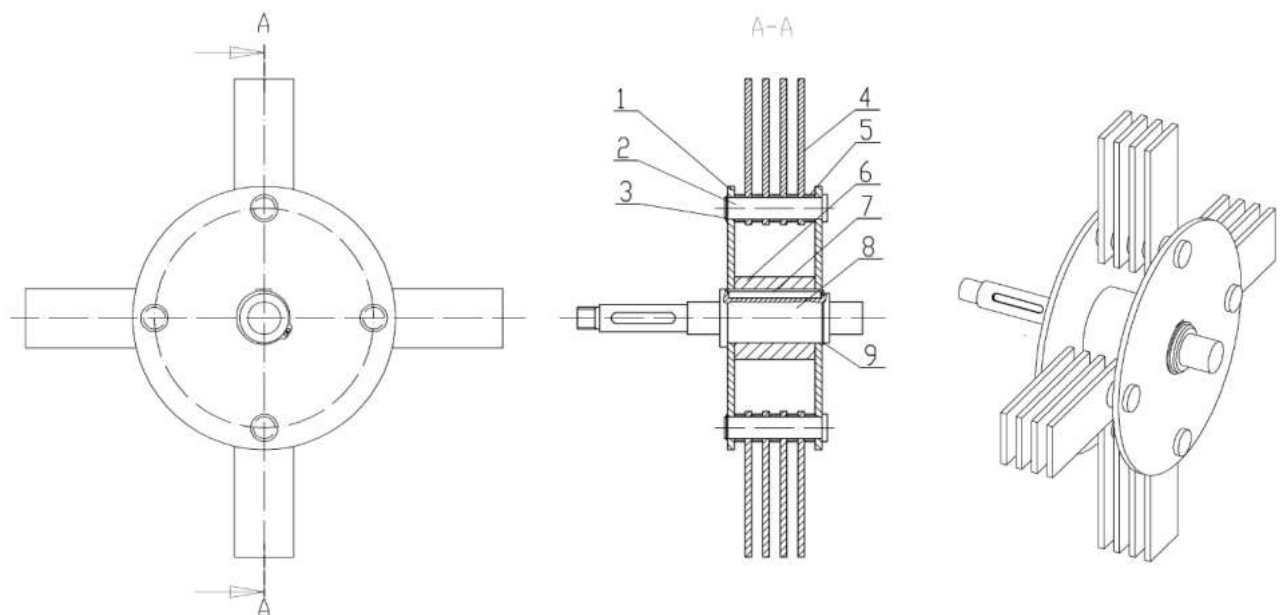


Рисунок 1.12 – Типовий ротор молоткової дробарки:

- 1 – опорний диск; 2 – вісь; 3 – стопорне кільце; 4 – молоток;  
5, 6 – дистанційні втулки; 7 – шпонка; 8 – вал ротора; 9 – стопорне кільце

У промислових дробарках діаметр ротора становить 200–1000 мм, причому за формою виділять три типи роторів: у вигляді диска, кільця та зірки. Переважно використовуються дискові ротори, які характеризуються найнижчим питомим енергоспоживанням [89; 90; 92; 94].

Залежно від конструкції дискові ротори в молоткових подрібнювачах мають круглу, шестигранну, трикутну або квадратну форму (рис. 1.13).

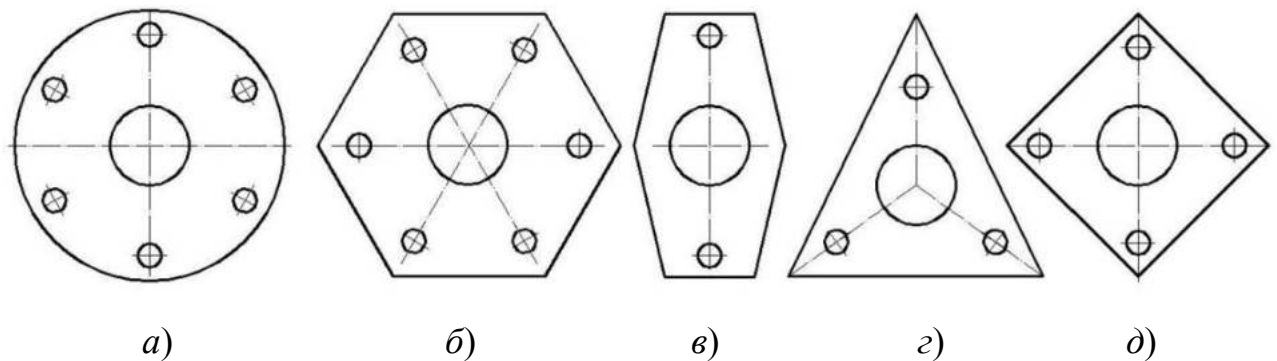


Рисунок 1.13 – Форми дисків роторів молоткових дробарок: *a* – круглий диск; *б* – шестигранний диск; *в* – фігурний диск з похилими бічними гранями; *г* – трикутний диск; *д* – квадратний диск

Залежно від конструктивних особливостей і необхідної кількості молотків обирають форму дисків роторів, найпоширеніша – круглий диск (див. рис. 1.13, *a*). Якщо мала кількість пар молотків, для зниження металоємності дробарки використовують спеціальні форми дисків роторів (див. рис. 1.13, *в, г, д*).

### 1.2.1. Аналіз конструкцій молотків

Молотки найчастіше виготовляють з пружинної сталі 65Г, термічно обробленої хромонікелевої легованої сталі або вуглецевої сталі 60Г з підвищеним вмістом марганцю. Твердість молотків становить 390–475 НВ. Форма молотків значно впливає на процес помелу [13; 14], причому за формою та призначенням розрізняють молотки у вигляді прямокутної пластини (рис.

1.14, *a, б*), пластини зі ступінчастими торцями (рис. 1.14, *в, г*), складної форми (рис. 1.14 *д*).

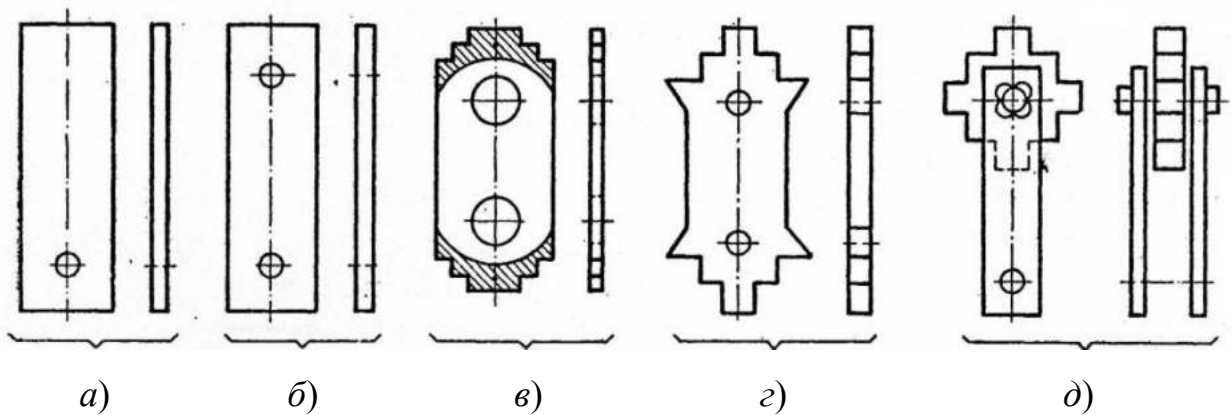


Рисунок 1.14 – Молотки різної форми: *a, б* – прямокутна пластина;  
*в, г* – пластина зі ступінчастими торцями; *д* – складні форми

У конструкції молоткових дробарок найчастіше використовуються прямокутні пластини товщиною 1,5–10 мм та пластини з вирізами на торцях. Їхня характерна особливість – простота виконання та значний термін експлуатації. Молотки зі ступінчастими торцями ефективніші для подрібнення сіна та полови, а прямокутні молотки зі спеціальними виступами використовуються для подрібнення волокнистих матеріалів. У конструктивних рішеннях молотків використовуються додаткові отвори, які дозволяють їх змінне кріплення, що збільшує термін служби. Молотки з одним отвором зають змогу подвоїти їхню довговічність внаслідок повертання навколо поздовжньої осі, тоді як молотки з двома отворами дозволяють використовувати робочі кромки чотири рази. На рис. 1.14 і 1.15 показані запатентовані конструкції спеціальних молотків, які можуть використовуватися для подрібнення зернових культур [99–101].

Молоток квадратної форми (див. рис. 1.15, *a*) з чотирма симетричними отворами для його шарнірного підвісу. Робоча торцева поверхня складається із зубців, що виконані у вигляді нахиленої поверхні під кутом  $45^\circ$ , спрямованої в напрямків удару; у поперечному перерізі вони виконані у вигляді зрізаного конуса з допоміжними виступами. Молоток у вигляді пластини з отворами для



кріплення і торцевими гранями з прорізами, які ділять кінці молотка на ділянки, що Г-подібно відігнуті, а стінки прорізів утворюють додаткові лобові робочі грані (див. рис. 1.15, б).

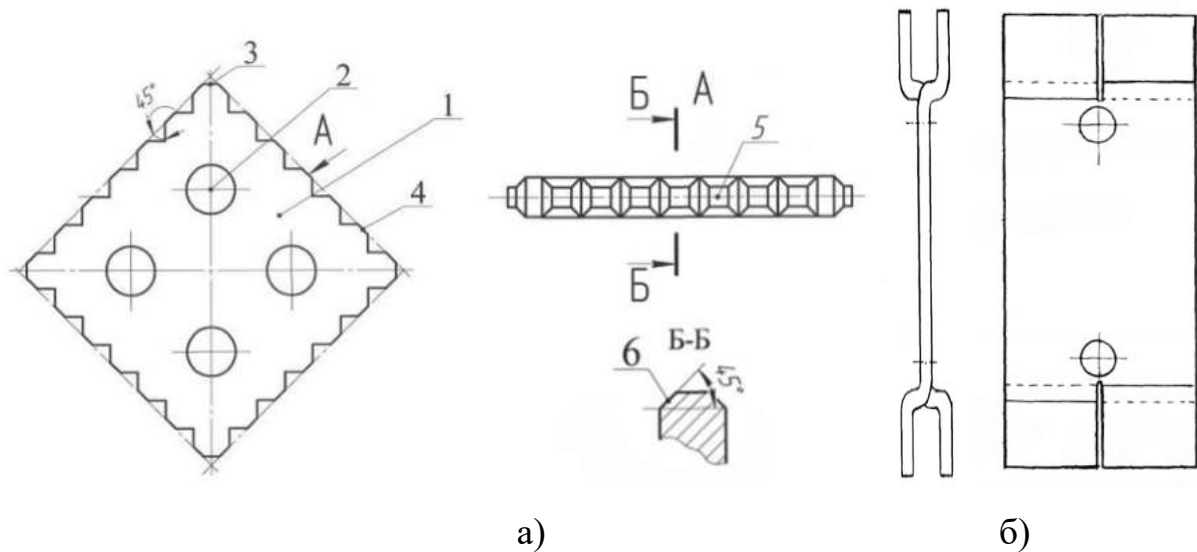


Рисунок 1.15 – Молотки для подрібнення зернових культур:

*a* – квадратні: 1 – пластина квадратної форми; 2 – чотири симетричні отвори; 3 – чотири бічні ударні кромки; 4 – чотири робочі поверхні, нахилені під кутом  $45^\circ$  у вигляді зубців; 5 – форма робочої поверхні у вигляді зрізаного конуса; 6 – допоміжні виступи; *б* – молоток із відігнутими боковими гранями.

Кільцеві молотки (рис. 1.16) виконані у вигляді кільця із зубчастими виступами і центральним отвором для шарнірного їх підвісу.

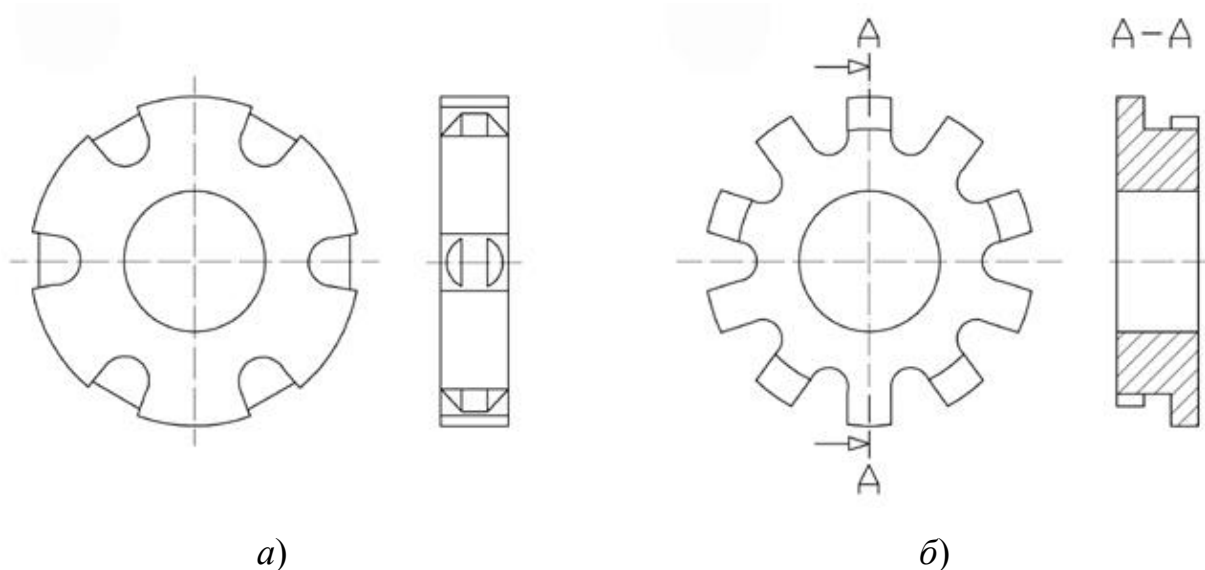


Рисунок 1.16 – Кільцеві молотки: *a* – однорядні; *б* – дворядні

Розміри молотків вибирають залежно від матеріалу, що подрібнюється, зокрема для подрібнення зернових культур рекомендується використовувати молотки товщиною 2–4 мм, а для стеблових кормів 6–8 мм. Довжина молотків знаходиться в межах 100–200 мм і залежить від діаметра ротора дробарки [13; 14; 92].

### 1.2.2. Аналіз конструкцій решіт

Решета молоткових дробарок використовуються для виведення подрібненого матеріалу з робочої камери та інтенсифікації процесу перероблення. Конструкція решіт характеризується їх товщиною, розміром отворів у решеті та кутом охоплення ротора.

У молоткових дробарках використовують решета з діаметром отворів від 2 до 12 мм. Діаметр отворів визначає ступінь подрібнення матеріалу і значно впливає на енергоспоживання. Вчені В. Р. Альошкін і С. В. Мельников [111; 112] зазначають, що пропускна здатність решета визначається коефіцієнтом живого перерізу, тобто відношенням площі отворів, через які проходить подрібнений матеріал, до загальної площі решета. Для штампованих решіт живий переріз становить 40–70 % [102].

Решета виготовляють із листової сталі товщиною 2–8 мм. Отвори штамнують на тонких і свердлять на товстих решетах. Щоб мінімізувати опір тертю під час проходження матеріалу, просвердлені отвори мають циліндричну форму (рис. 1.17). Основним недоліком решіт є швидкий знос отворів.

Вплив площі поверхні решета на основні показники процесу подрібнення зерна вивчали В. Р. Альошкін, С. В. Мельников, В. І. Сироватка, А. А. Зеленев, Г. І. Шуб, І. В. Коношін, В. Н. Ткаленко, І. І. Ревенко і багато інших вчених. Більшість із них дійшли висновку, що зі збільшенням площі поверхні решета зростає і пропускна здатність дробарки.

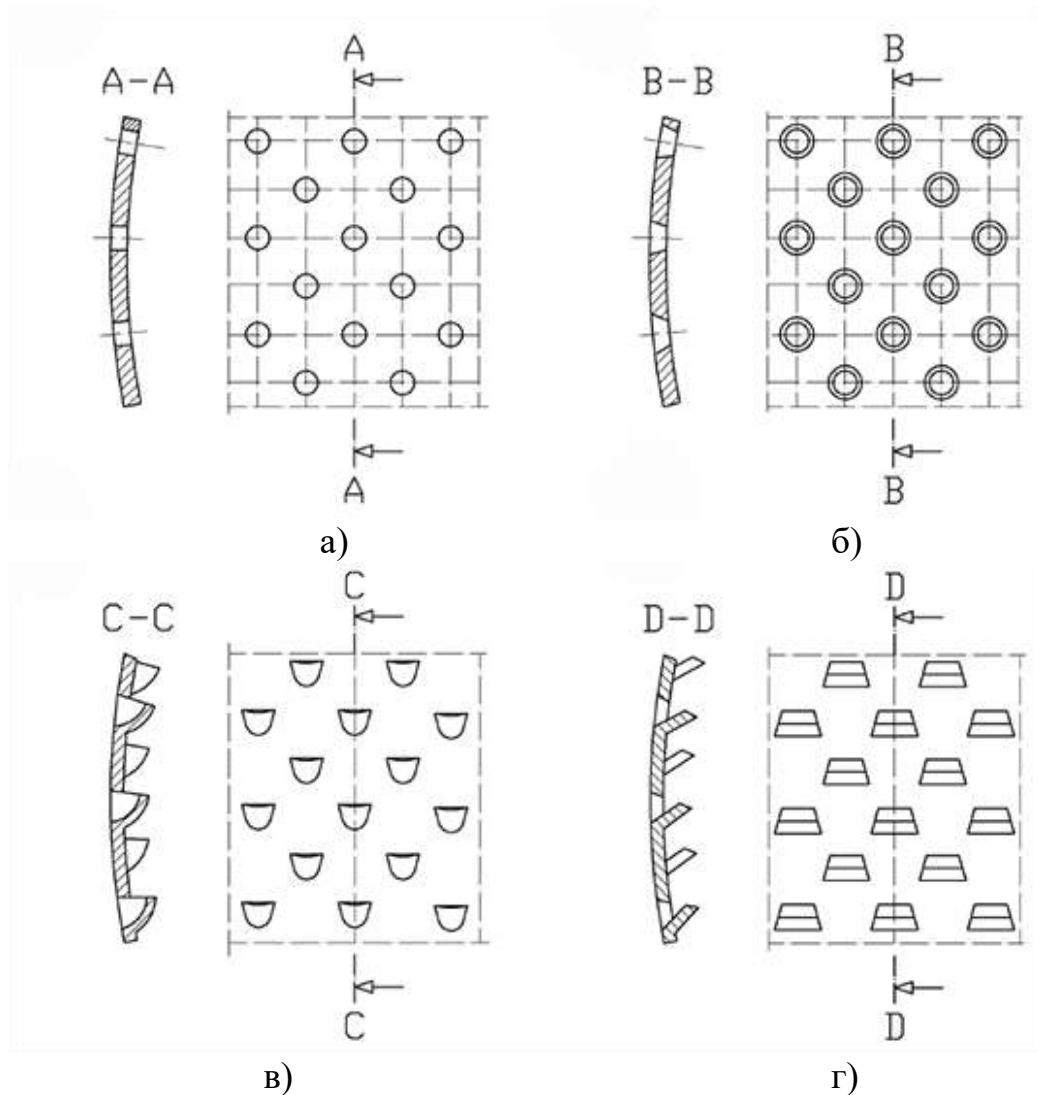


Рисунок 1.17 – Типи отворів у решетах молоткових дробарок:

*а* – круглі; *б* – конусні; *в* – напівкруглі; *г* – трапецієподібні

Для периферійної подачі можуть використовуватися сита з охопленням від  $180^\circ$  до  $270^\circ$ . Для дробарок із боковим завантаженням кут охоплення становить  $360^\circ$ . Збільшення кута охоплення до  $360^\circ$  підвищує пропускну здатність на 20–46% і знижує енергоємність машин на 19% [103].

### 1.3. Аналіз теорій подрібнення зернового матеріалу

Аналіз стану дослідження питання передбачає вивчення й аналіз основних теорій, що описують взаємозв'язок між роботою та енергією подрібнення зі зміною об'єму та питомої поверхні матеріалу. Узагальнена теорія процесу

подрібнення передбачає визначення енергії, необхідної для зміни структури матеріалу. До прикладних належать теорії відомих дослідників [104]: П. Ріттінгера; Ф. Кіка; Ф. Бонда (з удосконаленнями Ф. Свенсона), І. Брача (з удосконаленнями В. Соколовського), П. Ребіндера, С. Мельникова.

Теорія П. Ріттінгера [105; 110] називається поверхневою теорією, згідно з якою робота, необхідна для подрібнення матеріалу, змінюється пропорційно до площі поверхні, що утворилася під час подрібнення

$$A = k_1 \Delta s, \quad (1.11)$$

де  $\Delta s$  – збільшення поверхні матеріалу,  $\text{м}^2$ ,

$k_1$  – коефіцієнт пропорційності, що відповідає роботі, необхідній для утворення нової поверхні,  $\text{Дж}/\text{м}^2$ .

Енергія для подрібнення в цьому разі становить

$$E_m = k \left( \frac{1}{x_2} - \frac{1}{x_1} \right), \quad (1.12)$$

де  $E_m$  – енергія подрібнення,  $\text{Дж}$ ;

$k$  – коефіцієнт пропорційності,  $\text{Дж} \cdot \text{м}^2$ ;

$x_1, x_2$  – розмір зерна до і після подрібнення,  $\text{мм}$ .

Теорія, яку називають об'ємною, запропонована Ф. Кіком. Ця теорія заснована на дослідженні міцності матеріалу в процесі його подрібнення або удару. Передбачається, що матеріал деформується під дією зовнішньої сили стиску, яка спричинює напруження в подрібнюваному матеріалі. Коли створені напруження перевищують межу міцності на стиск, тіло розпадається на дрібніші фрагменти, тобто подрібнюється. З теорії Ф. Кіка випливають три основні положення.

Перше – коефіцієнт роботи, необхідної для однакової зміни формальної структури двох подібних тіл, дорівнює співвідношенню їх ваги або об'єму [106]

$$\frac{A_1}{A_2} = \frac{V_1}{V_2} = \frac{G_1}{G_2} = \frac{1}{k^3}, \quad (1.13)$$

де  $A_1, A_2$  – робота, затрачена для подрібнення відповідно першого і другого тіл,  $\text{Дж}$ ;

$V_1, V_2$  – об'єми першого і другого тіл, вага яких  $G_1$  і  $G_2$ , м<sup>3</sup>;

$k = d_1 / d_2$  - відношення лінійних розмірів тіл –  $d_1$  і  $d_2$ .

Друге – відношення сил, необхідних для зміни геометрії двох подібних тіл, є таке ж, як відношення їхніх поверхонь

$$\frac{L_1}{L_2} = \frac{P_1 \Delta l_1}{P_2 \Delta l_2} = \frac{\sigma F_1 \Delta l_1}{\sigma F_2 \Delta l_2} = \frac{1}{k^3}, \quad (1.14)$$

де  $P_1, P_2$  – зусилля руйнування першого і другого тіла, Н;

$\Delta l_1, \Delta l_2$  – деформація тіла, м;

$\sigma$  – напруження руйнування тіла, МПа;

$F_1, F_2$  – площа поперечного перерізу тіла, м<sup>2</sup>.

Згідно з третім положенням, робота одноразового поділу тіла відомих розмірів і форми дорівнює добутку маси або об'єму цього тіла і одиничної роботи поділу. У цьому випадку робота визначається з формулою [106]

$$A_K = A_{\text{од.к}} V = \frac{\sigma_N^2 V}{2E} = C_K V, \quad (1.15)$$

де  $A_{\text{од.к}}$  – одинична робота поділу маси тіла або об'єму,  $A_{\text{од.к}} = C_K$ , МДж;

$\sigma$  – напруження руйнування, МПа;

$E$  – модуль пружності, МПа;

$V$  – об'єм тіла, м<sup>3</sup>;

$C_K$  – матеріальна константа, МДж/м<sup>3</sup>.

Енергія подрібнення, відповідно до теорії Ф. Кіка, становить

$$E_m = k \ln \frac{x_1}{x_2}. \quad (1.16)$$

Теорія Ф. Бонда [104; 107] передбачає, що подрібнення є частиною зміни розміру нескінченно великого твердого тіла до нескінченного числа нескінченно малих твердих тіл. Відповідно до цієї теорії, енергія, накопичена в матеріалі, обернено пропорційна до квадратного кореня умовного розміру зерна. Вважається, що робота подрібнення пропорційна до середнього геометричного об'єму та площі поверхні тіла, яке руйнується.

Залежність енергії подрібнення, за теорією Ф. Бонда, записується у такому вигляді [104]

$$E = K_{BO} \left[ \frac{1}{\sqrt{d_{80}}} - \frac{1}{\sqrt{D_{80}}} \right], \quad (1.17)$$

де  $D_{80}$ ,  $d_{80}$  – розмір отворів решета, через які проходить 80% неподрібненого і подрібненого продукту, м;

$K_{BO}$  – коефіцієнт пропорційності Бонда, кВт·год/мг.

Для визначення енергії подрібнення, за теорією Ф. Бонда, необхідно знати коефіцієнт  $K_{BO}$ , а точніше індекс роботи  $W_i$ , який визначає опір матеріалу до подрібнення. Коефіцієнт пропорційності  $K_{BO}$  визначається за формулою [104]

$$K_{BO} = 10 W_i. \quad (1.18)$$

Індекс роботи  $W_i$  визначається як робота, необхідна для подрібнення одиниці маси матеріалу від нескінченного розміру до 100 мкм. Індекс роботи для різних матеріалів для кульового млина становить [107]

$$W_i = \frac{16}{G^{0.82}} \sqrt{\frac{\gamma}{100}} \cdot 1,1, \quad (1.19)$$

де  $\gamma$  – розмір контрольних отворів сит (у даному випадку 100 мкм);

$G$  – кількість подрібненого матеріалу, що утворюється за один оберт млина, мг.

Згідно з гіпотезою Брача, тіло, яке піддається навантаженню, розпадається з перевищенням граничної енергії деформації, характерної для цього матеріалу. Перше основне припущення цієї гіпотези описує явище подрібнення тіла розміром  $D$  (м) до твердих тіл розміром  $d_1$  (м) згідно із залежністю [104]

$$d_1 = \frac{D}{\alpha}, \quad (1.20)$$

де  $\alpha$  – показник одиничного зменшення розміру частинок, постійний для певного матеріалу.

При наступних циклах  $i$  дії на матеріал отримуються зменшені продукти [104]

$$d_i = \frac{D}{\alpha^i}, \quad (1.21)$$

де  $i = 2, 3, 4 \dots n$  ( $n$  – число циклів дії на матеріал).

Друге важливе припущення гіпотези І. Брача стосується взаємозв'язку між енергією подрібнення та розміром подрібненого тіла. Стверджується, що зі зменшенням розмірів подрібнених частинок одинична енергія подрібнення  $E_{од}$ , Дж, яка необхідна для одноразового подрібнення одиниці маси з розміром частинок  $D$ , м, становить [104]

$$E_{од} = E_1 \left( \frac{D_0}{D} \right)^m, \quad (1.22)$$

де  $E_1$  – робота (Дж), необхідна для одноразового подрібнення одиниці маси розміром  $D_0$  (м);

$m$  – експериментально визначений показник.

Після перетворень [104]

$$E = K_B \left( \frac{1}{d^m} - \frac{1}{D^m} \right) \quad (1.23)$$

або в іншій формі

$$E_{\Pi} = \frac{\sigma_r^2}{2E_r \cdot \rho_r \cdot \alpha_r} (n_{ср} - 1), \quad (1.24)$$

де  $E_{\Pi}$  – енергія подрібнення одиниці маси матеріалу, МДж / кг;

$\sigma_r$  – напруження стиснення, за якого зерно руйнується, МПа;

$E_r$  – відносний модуль пружності зерна, МПа;

$\rho_r$  – густина зерна, кг / м<sup>3</sup>;

$\alpha_r$  – коефіцієнт росту площі після одноразового подрібнення;

$n_{ср}$  – середній ступінь подрібнення.

Дослідник Ф. Молендовський модифікував рівняння, що впливає з гіпотези І. Брача. На його думку, робота подрібнення може бути визначена із залежності [108]

$$E_{\Pi\text{М}} = \sum_{k=1}^{k=n} \frac{b_k}{100} \left( \frac{D_e}{d_k} - 1 \right) \frac{\sigma_r^2}{2E_r \rho_r \alpha_r}, \quad (1.25)$$

де  $E_{\Pi\text{М}}$  – енергія для подрібнення маси подрібнених зерен, МДж / кг;

$b_k$  – відсоткова частка  $k$ -го розмірного класу матеріалу після подрібнення, %;

$D_e$  – середній розмір частинок до подрібнення, м;

$d_k$  – еквівалентний розмір  $k$ -го розмірного класу, м.

Ця модель враховує фізичні властивості подрібненого матеріалу, швидкість зростання питомої поверхні матеріалу, гранулометричний склад за розміром подрібненого продукту [108].

Згідно з теорією П. Ребіндера [107; 110], енергія подрібнення  $E_m$ , Дж – це сума енергії, необхідної для створення нових поверхонь під час подрібнення та енергії деформації тіла

$$E_m = \sigma \Delta S + k \Delta V, \quad (1.26)$$

де  $\sigma$  – відносна енергія на одиницю площі тіла, Дж/м<sup>2</sup>;

$\Delta S$  – збільшення питомої суми поверхні частинок тіла в процесі подрібнення, м<sup>2</sup>;

$k$  – відносна енергія пластичних та пружних деформацій на одиницю об'єму, Дж/м<sup>3</sup>;

$\Delta V$  – приріст об'єму суми частинок у процесі подрібнення, м<sup>3</sup>.

Описані теорії оцінювання роботи та енергії подрібнення відповідають строго регламентованим лабораторним умовам. Ці теорії не враховують енергетичних аспектів, пов'язаних з машинним, промисловим подрібненням, де, крім роботи та енергії руйнування матеріалу, необхідні затрати додаткової енергії для подолання опору руху, аеродинамічного опору, багаторазового руйнування, втрат, пов'язаних з ефективністю подрібнювача.

Теорія С.В. Мельникова доповнює теорії Л. Ребіндера введенням у математичні моделі коефіцієнтів, що враховують властивості машини і подрібненого матеріалу, а також враховують умови, яким відповідає ця теорія [109]

$$A_d = C_1 \ln i^3 + C_2(i - 1), \quad (1.27)$$

де  $A_d$  – одиниця роботи деформації, Дж / кг;

$i$  – ступінь подрібнення;

$C_1, C_2$  – коефіцієнти, встановлені експериментально, Дж / кг.



## Висновки до розділу 1

На підставі проведеного огляду можна зробити такі висновки:

1. Підвищити ефективність згодовування корму можна оптимізацією розміру частинок подрібненого зерна для кожного виду тварин відповідно до зоотехнічних вимог.
2. Дробарки ударної дії є найпоширенішим типом машин для подрібнення фуражного зерна під час приготування корму тваринам. Процес подрібнення зерна є складним і недостатньо дослідженим явищем.
3. Мета вдосконалення конструкцій подрібнювальних машин ударної дії передбачає зменшення витрат енергії на процес подрібнення і підвищення однорідності гранулометричного складу готового продукту.

## РОЗДІЛ 2

### ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ПОДРІБНЕННЯ НАСІНИН ЗЕРНОВИХ КУЛЬТУР

Процес подрібнення супроводжується затратами енергії на пружні і пластичні деформації подрібнюваних зернин для досягнення максимально допустимих напружень. Тоді зернина руйнується і утворюються окремі частини, площа поверхні яких більша від площі поверхні цілісної зернини.

#### 2.1. Розробка моделі процесу руйнування зерна

У молоткових дробарках подрібнення відбувається внаслідок удару молотка по зернині, яка частково руйнується і відбивається до рифленої поверхні корпусу, від удару з якою продовжується руйнування подрібнюваного матеріалу. Швидкість руху продуктово-повітряного шару становить близько 40–60 % від лінійної швидкості молотка.

Додатково відбувається процес руйнування подрібнюваного матеріалу, який потрапив у простір між боковими поверхнями молотка і нерухомо встановленої пластини. У процесі відносного руху молотка вздовж пластини відбувається заклинювання матеріалу та подальше руйнування. Подрібнення відбувається за умови, що середній розмір частинки подрібнюваного матеріалу більший за мінімальну початкову відстань між молотком і пластиною. Крім того, зернина руйнується вдаряючись об торець нерухомо встановленої пластини, а внаслідок цього дещо зменшується швидкість продуктово-повітряного шару, що, своєю чергою, збільшує швидкість молотка відносно швидкості руху цього шару.

Якщо ж розмір  $b_n$  зернини 1 або подрібнюваної частинки більший за початковий розмір  $k_{max}$  клиноподібного зазору між молотком 3 та нерухомою пластиною 1, то зернина буде руйнуватися розколюванням (рис. 2.1).

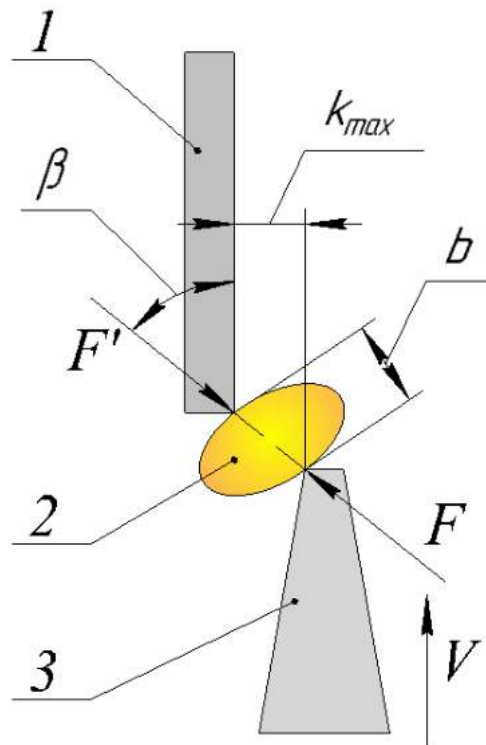


Рисунок 2.1 – Схема руйнування зернини розколюванням:

1 – пластина; 2 – зернина; 3 – молоток

Процес розколювання можна описати диференціальним рівнянням руху молотка [115; 121]

$$I_M \frac{d^2 \varphi_p}{dt^2} = -FR \cos \beta, \quad (2.1)$$

де  $I_M$  – момент інерції молотка відносно осі обертання ротора,  $\text{кг} \cdot \text{м}^2$ ;

$\varphi_p$  – кут повертання ротора дробарки, рад;

$F$  – сила контактної взаємодії молотка і зернини, Н;

$R$  – відстань від осі обертання ротора дробарки до точки взаємодії молотка із зерниною, м;

$\beta$  – кут між вектором сили  $F$  і боковою поверхнею пластини, град.

На зернину буде діяти сила  $F$  контактної взаємодії від молотка, яка, згідно з теорією Герца [115], залежатиме від зближення тіл

$$F = K(\varphi_p R)^{\frac{3}{2}}, \quad (2.2)$$

де  $K$  – коефіцієнт, що залежить від фізичних та геометричних характеристик тіл, що взаємодіють.

Підставивши (2.1) у (2.2), отримаємо диференціальне рівняння відносно кута повороту  $\varphi$

$$I_M \frac{d\dot{\varphi}_p}{d\varphi_p} \frac{d\varphi_p}{dt} = -RK(\varphi_p R)^{\frac{3}{2}} \cos\beta. \quad (2.3)$$

Проінтегрувавши (2.3), можна визначити значення максимального кута руйнування розколюванням  $\varphi_{max}$

$$\frac{I_M}{2} \omega^2 = K \frac{2}{5} R^{\frac{5}{2}} \varphi_{max}^{\frac{5}{2}} \cos\beta, \quad (2.4)$$

звідки

$$R\varphi_{max} = \left( \frac{5}{4} \frac{I_H \omega^2}{K \cos\beta} \right)^{\frac{2}{5}}. \quad (2.5)$$

Підставивши (2.5) у (2.2), визначимо максимально можливе значення сили дії молотка на зернину

$$F_{max} = K^{\frac{2}{5}} \left( \frac{5}{4} \frac{I_H \omega^2}{K \cos\beta} \right)^{\frac{2}{5}}. \quad (2.6)$$

Оскільки маса молотка значно більша від маси зернини, то сила  $F_{max}$  значно перевищуватиме необхідну для руйнування зернини силу, тому можна стверджувати, що руйнування буде відбуватися гарантовано.

## 2.2. Умова защемлення зернини

Розглянемо процес подрібнення зернин 2 (рис. 2.2) пшениці за рахунок їх заклинювання у щілині з кутом  $\alpha$ , утвореній боковими поверхнями рухомого молотка 3 та нерухомо встановленої пластини 1.

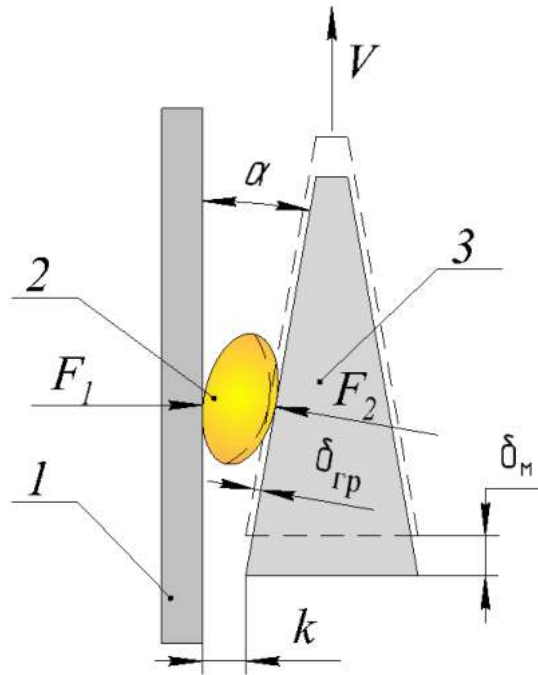


Рисунок 2.2 – Схема навантаження: 1 – пластина; 2 – зернина; 3 – молоток

Для забезпечення процесу заклинювання зернини у щілині між молотком та пластиною потрібно визначити необхідний кут  $\alpha$  між їх поверхнями, виходячи з дії сил на тіло, що знаходиться між цими поверхнями (рис. 2.3).

Необхідним фактором для заклинювання зернини є зазор між рухомих молотком та нерухомо встановленою пластиною, який на вході повинен бути більшим від ширини зернини (див. рис. 2.3), а для її руйнування найменший розмір клинового зазору повинен бути меншим від ширини на значення, що перевищує деформацію руйнування зернини. У такому разі складова  $F_x$  зусилля дії молотка  $F_2$  буде спрямована перпендикулярно до нерухомої пластини, а складова  $F_y$  – уздовж цієї пластини. Також виникає сила протидії  $F_1$  з боку площини нерухомої пластини та сили тертя  $F_{T1}$  і  $F_{T2}$  зернини по поверхнях відповідно пластини і молотка.

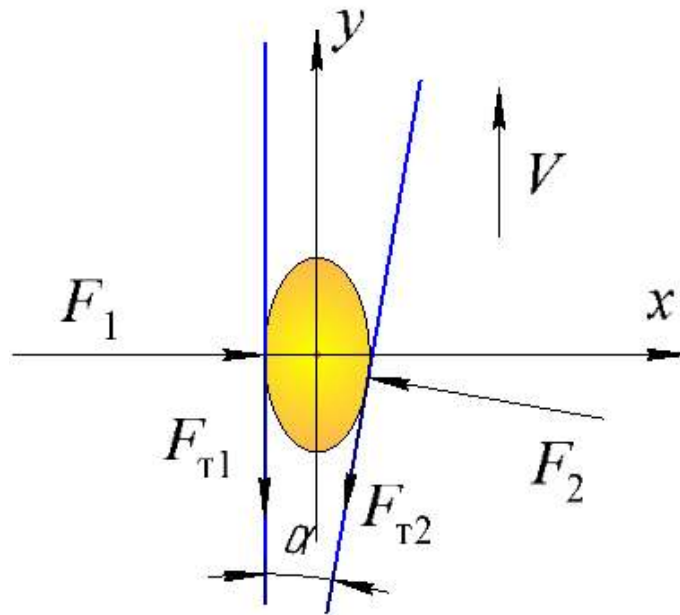


Рисунок 2.3 – Дія сил на зернину

Мінімальний зазор між молотком і пластиною зумовлюється необхідним ступенем подрібнення та конструктивним виконанням молоткової дробарки.

Запишемо умову миттєвої рівноваги зернини, знехтувавши її масою, яка набагато менша від маси молотка, у вигляді системи рівнянь сил, спроектованих на вертикальну  $y$  та горизонтальну  $x$  осі:

$$\left. \begin{aligned} -F_{T1} - F_{T2} \cos \alpha + F_2 \sin \alpha &= 0; \\ F_1 - F_{T2} \sin \alpha - F_2 \cos \alpha &= 0, \end{aligned} \right\} \quad (2.7)$$

$$\left. \begin{aligned} F_{T1} &= f_1 F_1; \\ F_{T2} &= f_2 F_2, \end{aligned} \right\} \quad (2.8)$$

де  $f_1$  і  $f_2$  – коефіцієнти тертя зерен по поверхнях відповідно нерухомої пластини та молотка.

Підставляємо вирази  $F_{T1}$  і  $F_{T2}$  у систему рівнянь (2.7):

$$\left. \begin{aligned} f_1 F_1 &= F_2 (f_2 \cos \alpha - \sin \alpha); \\ F_1 &= F_2 (f_2 \sin \alpha + \cos \alpha). \end{aligned} \right\} \quad (2.9)$$

Розділивши перше рівняння системи (2.9) на друге, отримуємо

$$f_1 = \frac{\sin \alpha - f_2 \cos \alpha}{f_2 \sin \alpha + \cos \alpha} = \frac{\operatorname{tg} \alpha - f_2}{1 + f_2 \operatorname{tg} \alpha}. \quad (2.10)$$

Рівняння (2.10) визначає граничне значення коефіцієнта тертя зерна по нерухомо встановленій пластині, за якого відбувається заклинювання. Якщо коефіцієнт тертя більший від  $f_1$ , заклинювання відбудеться гарантовано.

Із формули (2.10) визначимо критичне значення кута  $\alpha$

$$\alpha \leq \operatorname{arctg} \left( \frac{f_1 + f_2}{1 - f_1 f_2} \right). \quad (2.11)$$

Прийнявши, що  $f_1 = f_2 = f$ , побудована залежність (рис. 2.4) кута защемлення від коефіцієнта тертя зернини за рівнянням регресії

$$\alpha = -0,2172 + 122,513f - 32,1659f^2. \quad (2.12)$$

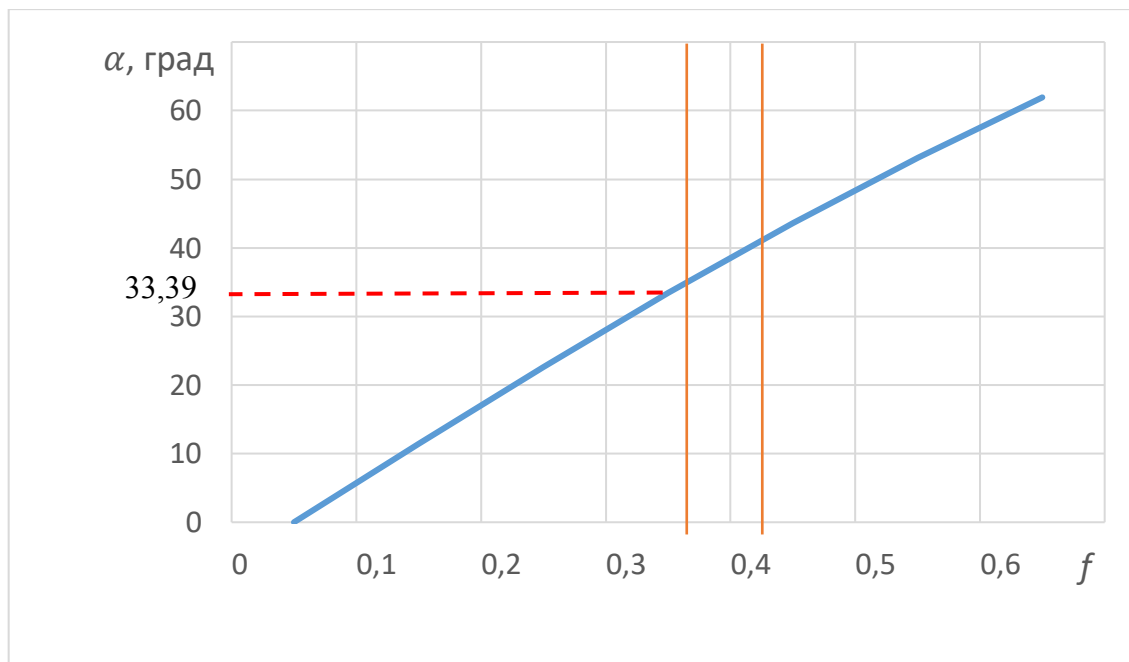


Рисунок 2.4 – Залежність кута защемлення від коефіцієнта тертя зернини

Згідно з проведеними експериментальними дослідженнями [135], коефіцієнт тертя ковзання зерна пшениці по сталевих поверхнях залежно від сорту пшениці, її вологості і шорсткості поверхні знаходиться в межах 0,3–0,37. Отже, для гарантованого заклинювання зерна між молотком та нерухомою пластиною кут  $\alpha$  не повинен перевищувати  $33,39^\circ$ .

### 2.3. Заповненість зазору між молотком і пластиною

Ротори більшості молоткових дробарок невеликих розмірів та потужності обертаються в робочому режимі з частотою близько  $50 \text{ с}^{-1}$  (3000 об/хв).

На рис. 2.5 зображено схему підвісу молотка дробарки. Коли зернина защемлена між молотком і нерухомо встановленою пластиною з кутом  $\alpha$  між ними, для подрібнення потрібно прикласти зусилля  $F_x$  із деформацією  $\delta$ , щоб напруження  $\sigma$ , у зернині, перевищили напруження подрібнення. Робота руйнування однієї зернини згідно з експериментальними дослідженнями [142] становить  $A_{pz} = 0,03 \text{ Дж}$ .

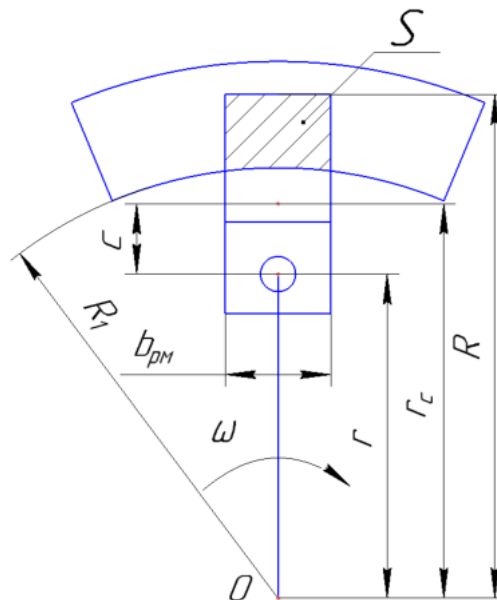


Рисунок 2.5 – Схема підвісу молотка дробарки

Колова швидкість  $V$ , м/с, руху молотка становить

$$V = \omega R, \quad (2.13)$$

де  $\omega$  – кутова швидкість обертання ротора дробарки, рад/с;

$R$  – відстань від осі обертання до краю молотка, м;

$$\omega = \frac{\pi n}{30}, \quad (2.14)$$

де  $n$  – частота обертання ротора дробарки, об./хв.



Тоді швидкість  $V_H$  зближення точки контакту зернини на робочій боковій поверхні молотка з площиною нерухомо встановленої пластини дорівнює

$$V_H = V \sin \alpha. \quad (2.15)$$

Момент інерції  $I_M$ ,  $\text{кг} \cdot \text{м}^2$ , молотка

$$I_M = mr_c^2 + m \frac{h^2}{12}, \quad (2.16)$$

де  $m$  – маса молотка,  $\text{кг}$ ;

$r_c$  – відстань від осі обертання ротора  $O$  до центра маси молотка,  $\text{м}$ ;

$h$  – висота молотка,  $\text{м}$ .

Тоді кінетична енергія молотка  $E$ ,  $\text{Дж}$ , буде

$$E = \frac{I_M \omega^2}{2}. \quad (2.17)$$

Як бачимо, кінетична енергія молотка різко зростає із збільшенням кутової швидкості  $\omega$  обертання ротора дробарки.

Враховуючи кут між боковими поверхнями молотка та нерухомо встановленої пластини  $\alpha$ , нормальна складова  $E_H$ ,  $\text{Дж}$ , енергії молотка, що буде безпосередньо витрачена на руйнування зернин, становитиме

$$E_H = E \sin^2 \alpha. \quad (2.18)$$

Щоб досягнути граничної деформації для руйнування зернини  $\delta$ ,  $\text{мм}$ , молоток повинен пройти шлях  $\delta_M$ ,  $\text{мм}$ , по дузі радіусом  $R$

$$\delta_M = \frac{\delta}{\text{tg } \alpha}. \quad (2.19)$$

Ротор дробарки повинен повернутися на кут  $\varphi$ ,  $\text{град}$

$$\varphi = \frac{\delta_M}{R}. \quad (2.20)$$

Потужність, затрачену на руйнування зернини можна визначити за формулою

$$P = M\omega, \quad (2.21)$$

де  $M$  – момент, який під час обертового руху становить  $M = A_{pz}/\varphi$  ( $A_{pz}$  – робота руйнування однієї зернини).

Звідси

$$P = \frac{A_{pz}}{\varphi} \omega. \quad (2.22)$$

Підставивши (2.19) і (2.20) у (2.22), отримаємо потужність руйнування окремої зернини в клиноподібному зазорі між нерухомо встановленою пластиною та молотком:

$$P_H = \frac{A_{pz} R \operatorname{tg} \alpha}{\delta} \omega. \quad (2.23)$$

Одночасно в клиноподібному зазорі між нерухомо встановленою пластиною та молотком може перебувати певна кількість цілісних та подрібнених зернин. З ділянки контакту  $S$  пластини і молотка (див. рис. 2.5), яка буде обмежуватися геометричними параметрами молотка і пластини, можна визначити максимальну кількість подрібнюваного матеріалу, що там перебуватиме.

Отже, руйнування зернини, зацмленої між молотком та нерухомо встановленою пластиною, залежить як від конструктивних параметрів молоткової дробарки, так і від фізико-механічних параметрів подрібнюваного матеріалу, зокрема від роботи та деформації руйнування зернини.

$$S = (R - R_1) \cdot b_{pm}, \quad (2.24)$$

де  $b_{pm}$  – ширина робочої зони молотка, м.

Максимальна теоретично можлива кількість подрібнюваного матеріалу  $W$ , шт., яка може одночасно перебувати в об'ємі робочої зони між молотком та пластиною, буде залежати від конструктивного виконання і геометричних параметрів молотка та пластини, а також середнього геометричного розміру зернини  $\bar{h}$  між шириною  $b_3$  і товщиною  $h_3$ .

Функція щільності нормального розподілу окремих розмірів як випадкових величин є такою

$$f(x) = \frac{1}{\sigma[x]\sqrt{2\pi}} e^{-\left[\frac{(x-M[x])^2}{2\sigma^2[x]}\right]}, \quad (2.25)$$

де  $M[x]$  – теоретичне середнє, мм;

$\sigma[x]$  – середнє квадратне відхилення, мм;

$x$  – випадкова величина (довжина, ширина або товщина зерна), мм.

Розглядаючи ширину і товщину зернини як незалежні нормально розподілені випадкові величини, беручи до уваги вигляд диференціальної функції (2.25), модель їх двовимірного розподілу отримується таким чином:

$$f(b_3, h_3) = f(b_3)f(h_3), \quad (2.26)$$

$$f(b_3, h_3) = \frac{1}{2\pi\sigma[b_3]\sigma[h_3]} e^{-0,5\left[\frac{(b_3-M[b_3])^2}{\sigma^2[b_3]} + \frac{(h_3-M[h_3])^2}{\sigma^2[h_3]}\right]}, \quad (2.27)$$

а враховуючи коефіцієнт кореляції  $r_{bh}$  між довжиною  $b_3$  та шириною  $h_3$  зерна, двовимірна модель нормального розподілу матиме вигляд

$$f(b_3, h_3) = \frac{1}{2\pi\sigma[b_3]\sigma[h_3]\sqrt{1-r_{bh}^2}} e^{\frac{-1}{2(1-r_{bh}^2)}\left[\frac{(b_3-M[b_3])^2}{\sigma^2[b_3]} + \frac{(h_3-M[h_3])^2}{\sigma^2[h_3]} - 2r_{bh}\frac{b_3-M[b_3]}{\sigma[b_3]}\frac{h_3-M[h_3]}{\sigma[h_3]}\right]}, \quad (2.28)$$

де  $M[b_3], M[h_3]$  – теоретичне середнє значення ширини і товщини зернини відповідно, мм;

$\sigma[b_3], \sigma[h_3]$  – середнє квадратне відхилення ширини і товщини зернини відповідно, мм;

$r_{bh}$  – значення коефіцієнта кореляції між  $b_3$  і  $h_3$ .

Коефіцієнт кореляції розраховували за формулою (3.4).

Значення середнього розміру зеренини  $\bar{h}$  для пшениці сорту Смутлянка становить 3,05 мм і варіює в межах 2,9–3,2 мм (рис. 4.9).

Визначення максимально можливої кількості  $W$  зернин, що перебувають у проміжку між молотком і пластиною і будуть піддані одночасному руйнуванню, здійснено за допомогою програмного середовища *MathCAD* з використанням методів програмування [113; 114]. Величину  $W$  як функцію від зазору  $k$  між молотком і нерухомо встановленою пластиною та кута  $\alpha$  між їхніми боковими поверхнями, наведено у дод. А.

У результаті отримано графік лінії рівнів теоретичної заповненості зазору між молотком та нерухомо встановленою пластиною (рис. 2.6).

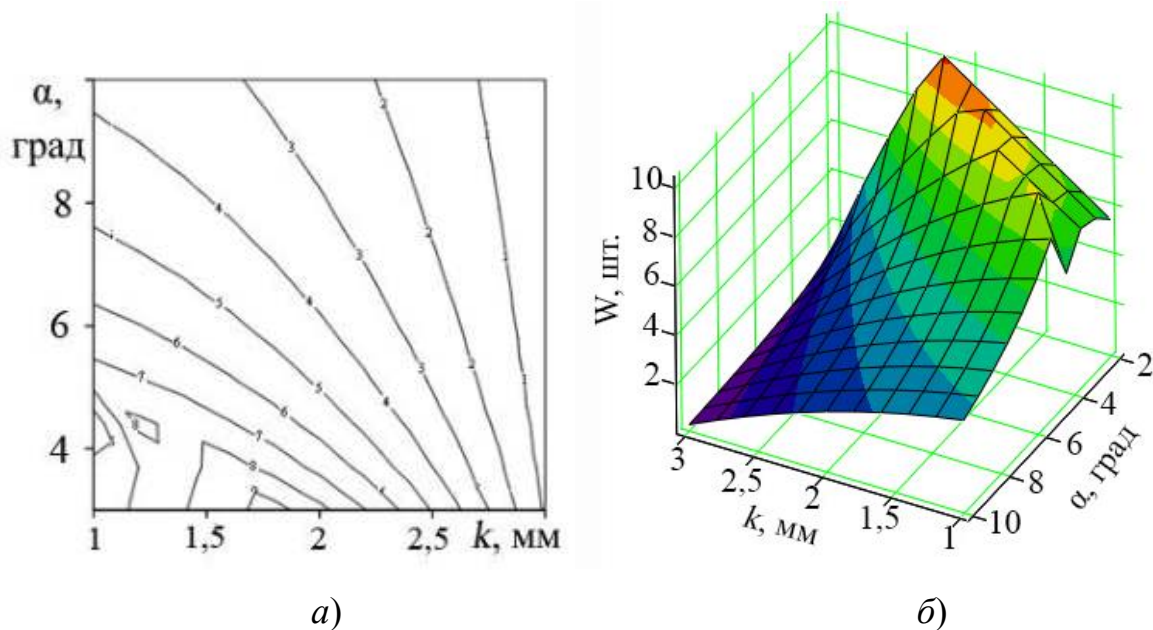


Рисунок 2.6 – Теоретична заповненість зазору між молотком та нерухомо встановленою пластиною  $W = 1-9$ :  $a$  – лінії рівнів  $W$ ;  $b$  – поверхня відгуку.

Як видно з рис. 2.6, найбільш можлива теоретично-ймовірна заповненість зазору між молотком та нерухомо встановленою пластиною у кількості  $W = 8-9$  зерен буде в разі зазору  $k = 1,5-2$  мм та при мінімальному куті нахилу бокової

грані молотка  $\alpha = 3,5\text{--}4^\circ$ . Подальше зменшення кута  $\alpha$  суттєво не впливає на кількість зерен через обмежену ширину молотка.

#### 2.4. Ексцентриситет площі контакту зерна пшениці і площини молотка

У процесі дослідження контактної взаємодії зерна пшениці з плоскою поверхнею молотка будемо вважати, що форму зернини з достатньою точністю можна описати рівнянням еліпсоїда, яке у канонічній формі має вигляд

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} + \frac{z^2}{c^2} = 1, \quad (2.29)$$

де  $a, b, c$  – відповідно півосі еліпсоїда.

Причому система координат вибрана так, що  $a \geq b \geq c$ . Надалі прийнемо такі характерні розміри зернини:  $l_3 = 2a = 6,6$  мм;  $b_3 = 2b = 3,6$  мм;  $h_3 = 2c = 2,8$  мм.

Згідно з теорією Герца [115] площа контакту завжди є еліптичним диском, розміри якого залежать від навантаження (сили  $F$ ) і від фізичних та геометричних характеристик тіл, що контактують.

Якщо, наприклад, контакт зернини з поверхнею молотка відбувається у точці з координатами  $O_1 (0, 0, -c)$ , то рівняння еліпса (рис. 2.7), який обмежує площину контакту, матиме вигляд

$$\left. \begin{aligned} \frac{x^2}{a_1^2} + \frac{y^2}{b_1^2} &= 1; \\ a_1 &\leq b_1, \end{aligned} \right\} \quad (2.30)$$

де  $a_1, b_1$  – півосі еліпса, який обмежує площину контакту, мм.

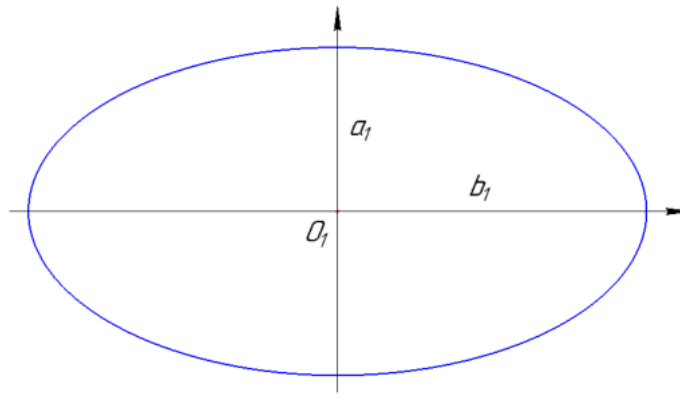


Рисунок 2.7 – Еліпс, який обмежує площину контакту

Ексцентриситет  $e_1$  цього еліпса

$$e_1 = \sqrt{1 - \frac{a_1^2}{b_1^2}}. \quad (2.31)$$

Параметр  $e_1$  залежить тільки від геометричних характеристик поверхонь у точці контакту і визначається з рівняння

$$\frac{1 - e_1^2}{e_1^2} \cdot \frac{K(e_1) - E(e_1)}{E(e_1)} = \frac{B_1}{A_1 + B_1}, \quad (2.32)$$

де  $K(e_1) = \int_0^{\pi/2} \frac{d\varphi}{\sqrt{1 - e_1^2 \sin^2 \varphi_e}}$  – повний еліптичний інтеграл першого роду;

$E(e_1) = \int_0^{\pi/2} \sqrt{1 - e_1^2 \sin^2 \varphi_e} d\varphi$  – повний еліптичний інтеграл другого роду;

$A_1, B_1$  – геометричні характеристики еліпса, м;

$\varphi_e$  – амплітуда еліпса, град.

Для знаходження повних еліптичних інтегралів першого і другого роду побудовано функцію, яка наведена в дод. Б, графіки розрахунків цих інтегралів зображені на рис. 2.8.

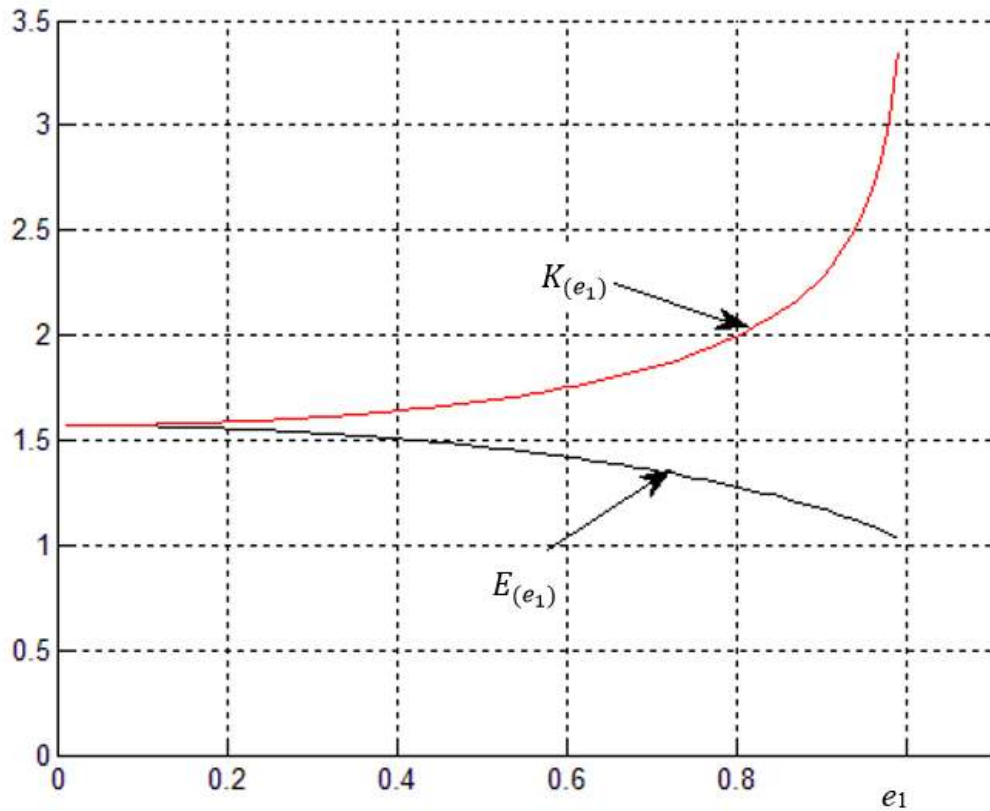


Рисунок 2.8 – Залежності повних еліптичних інтегралів першого роду  $K(e_1)$  та другого роду  $E(e_1)$  від параметра  $e_1$

Для знаходження геометричних характеристик  $A_1$  і  $B_1$  розкладемо рівняння поверхні (2.29) біля точки контакту в ряд, в якому досить врахувати тільки доданки з  $x^2$  і  $y^2$ , а саме:

$$z = -c \sqrt{1 - \frac{x^2}{a^2} - \frac{y^2}{b^2}} = -c + \frac{1}{2} \frac{c}{a^2} x^2 + \frac{1}{2} \frac{c}{b^2} y^2 + \dots \quad (2.33)$$

Оскільки завжди повинна виконуватись умова  $A_1 \geq B_1$ , тоді:

$$\left. \begin{aligned} A_1 &= \frac{1}{2} \frac{c}{b^2}; \\ B_1 &= \frac{1}{2} \frac{c}{a^2}. \end{aligned} \right\} \quad (2.34)$$

Ліву частину рівняння (2.32) розглянемо як функцію параметра  $e_1$

$$F(e_1) = \frac{1 - e_1^2}{e_1^2} \cdot \frac{K(e_1) - E(e_1)}{E(e_1)}. \quad (2.35)$$

На рис. 2.9 зображено графік функції  $F(e_1)$ , а в дод. В наведені її значення залежно від значень параметра  $e_1$ .

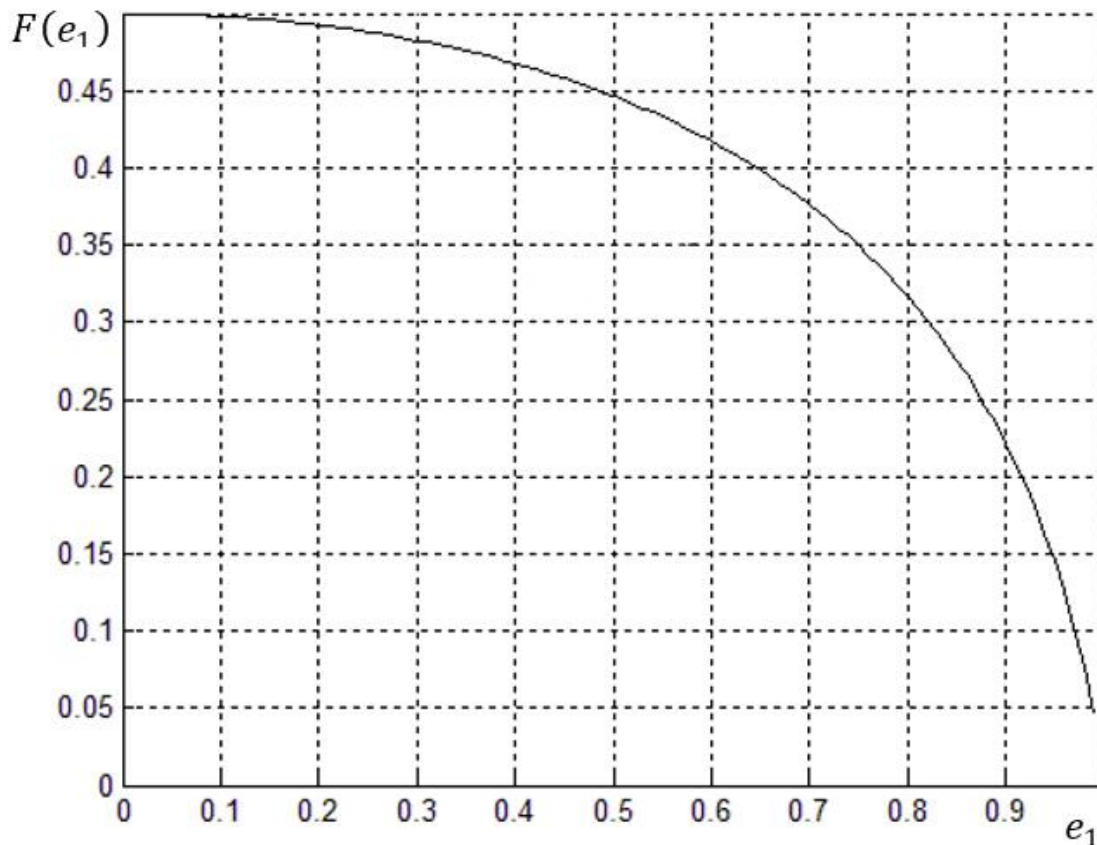


Рисунок 2.9 – Залежність  $F(e_1)$  від параметра  $e_1$

Використавши (2.34), обчислимо значення  $A_1$ ,  $B_1$ :

$$A_1 = \frac{1 \cdot 1,4}{2 \cdot 1,8^2} = 0,0216 \frac{1}{\text{мм}};$$

$$B_1 = \frac{1 \cdot 1,4}{2 \cdot 3,3^2} = 0,0643 \frac{1}{\text{мм}}.$$

Тоді

$$F(e_1) = \frac{B_1}{A_1 + B_1} = 0,2293,$$



а з дод. В знаходимо відповідне значення ексцентриситету  $e_1 = 0,894$ .

Аналогічно, якщо контакт відбувається у точці  $O_2$  з координатами  $O_2 (0, -b, 0)$ , то рівняння еліпса, що обмежує площину контакту, матиме вигляд

$$\left. \begin{aligned} \frac{x^2}{a_2^2} + \frac{z^2}{c_2^2} = 1, \\ a_2 \leq c_2, \end{aligned} \right\} \quad (2.36)$$

де  $a_2, c_2$  – півосі еліпса, який обмежує площину контакту, мм.

Ексцентриситет  $e_2$  становить

$$e_2 = \sqrt{1 - \frac{c_2^2}{a_2^2}}. \quad (2.37)$$

Розкладемо рівняння поверхні (2.29) в ряд біля точки контакту  $O_2$

$$y = -b \sqrt{1 - \frac{x^2}{a^2} - \frac{z^2}{c^2}} = -b + \frac{1}{2} \frac{b}{a^2} x^2 + \frac{1}{2} \frac{b}{c^2} z^2 + \dots \quad (2.38)$$

У цьому випадку:

$$A_2 = \frac{1 \cdot b}{2 \cdot c^2} = \frac{1 \cdot 1,8}{2 \cdot 1,4^2} = 0,4592 \frac{1}{\text{мм}};$$

$$B_2 = \frac{1 \cdot b}{2 \cdot a^2} = \frac{1 \cdot 1,8}{2 \cdot 3,3^2} = 0,0826 \frac{1}{\text{мм}}.$$

Тоді

$$F(e_2) = \frac{B_2}{A_2 + B_2} = 0,1525,$$

а за цим значенням функції з дод. В визначаємо відповідне значення ексцентриситету  $e_2 = 0,946$ .

Якщо ж контакт зернини з молотком відбувається у точці  $O_3$  з координатами  $O_3 (-a, 0, 0)$ , то рівняння еліпса, що обмежує площу контакту, буде

$$\left. \begin{aligned} \frac{y^2}{a_3^2} + \frac{z^2}{c_3^2} = 1 \\ a_3 \geq c_3 \end{aligned} \right\}, \quad (2.39)$$

де  $a_3, c_3$  – півосі еліпса, який обмежує площину контакту, мм.

Ексцентриситет  $e_3$  еліпса

$$e_3 = \sqrt{1 - \frac{c_3^2}{a_3^2}}. \quad (2.40)$$

Знову розкладемо рівняння (2.29) в ряд біля точки контакту  $O_3(-a, 0, 0)$

$$x = -a \sqrt{1 - \frac{y^2}{b^2} - \frac{z^2}{c^2}} = -a + \frac{1}{2} \frac{a}{a^2} x^2 + \frac{1}{2} \frac{a}{c^2} z^2 + \dots. \quad (2.41)$$

Тоді відповідно

$$A_3 = \frac{1 \cdot a}{2 \cdot c^2} = \frac{1 \cdot 3,3}{2 \cdot 1,4^2} = 0,8418 \frac{1}{\text{мм}};$$

$$B_3 = \frac{1 \cdot a}{2 \cdot b^2} = \frac{1 \cdot 3,3}{2 \cdot 1,8^2} = 0,5093 \frac{1}{\text{мм}};$$

$$F(e_3) = \frac{B_3}{A_3 + B_3} = 0,3769.$$

За отриманими значенням функції з дод. В визначаємо відповідне значення ексцентриситету  $e_3 = 0,699$ .

## 2.5. Контактні напруження

Якщо молоток притискає зернину силою  $F_2$ , то на площині контакту виникають напруження, які згідно з теорією Герца можна визначити за формулою

$$q(x, y) = q_0 \left. \begin{array}{l} \sqrt{1 - \frac{x^2}{a_1^2} - \frac{y^2}{b_1^2}}; \\ -a_1 \leq x \leq a_1; \\ -b_1 \leq y \leq b_1. \end{array} \right\} \quad (2.42)$$

Сталу  $q_0$ , яка дорівнює напруженню в центрі площини контакту, знаходимо з рівняння рівноваги

$$\iint_A q(x, y) dx dy = F_2 \quad (2.43)$$

або

$$q_0 \iint_{A_k} \sqrt{1 - \frac{x^2}{a_1^2} - \frac{y^2}{b_1^2}} dx dy = F_2,$$

де  $A_k$  – площа контакту.

Для обчислення інтеграла зробимо заміну змінних

$$\left. \begin{array}{l} x = a_1 r \cos \varphi; \\ 0 \leq r \leq 1; \\ y = b_1 r \sin \varphi; \\ 0 \leq \varphi \leq 2\pi, \end{array} \right\} \quad (2.44)$$

тоді

$$\iint_A \sqrt{1 - \frac{x^2}{a_1^2} - \frac{y^2}{b_1^2}} dx dy = \int_0^{2\pi} \int_0^1 \sqrt{1 - r^2} \left| \begin{array}{cc} \frac{\partial x}{\partial r} & \frac{\partial x}{\partial \varphi} \\ \frac{\partial y}{\partial r} & \frac{\partial y}{\partial \varphi} \end{array} \right| dr d\varphi. \quad (2.45)$$

Обчислимо якобіан

$$\left| \begin{array}{cc} \frac{\partial x}{\partial r} & \frac{\partial x}{\partial \varphi} \\ \frac{\partial y}{\partial r} & \frac{\partial y}{\partial \varphi} \end{array} \right| = \left| \begin{array}{cc} a_1 \cos \varphi & -a_1 r \sin \varphi \\ b_1 \sin \varphi & b_1 r \cos \varphi \end{array} \right| = a_1 b_1 r. \quad (2.46)$$

Отже,

$$\begin{aligned} \iint_A \sqrt{1 - \frac{x^2}{a_1^2} - \frac{y^2}{b_1^2}} &= -\frac{a_1 b_1}{2} \int_0^{2\pi} d\varphi \int_0^1 \sqrt{1 - r^2} d(1 - r^2) = \\ &= \frac{a_1 b_1}{2} \cdot 2\pi \left( -\frac{2}{3} (1 - r^2)^{\frac{3}{2}} \right) \Big|_0^1 = \frac{2}{3} \pi a_1 b_1. \end{aligned} \quad (2.47)$$

Тоді  $q_0 = 3F_2/2\pi a_1 b_1$  і формула (2.42) матиме остаточний вигляд

$$q(x, y) = \frac{3F_2}{2\pi a_1 b_1} \sqrt{1 - \frac{x^2}{a_1^2} - \frac{y^2}{b_1^2}}. \quad (2.48)$$

Тепер з рівності

$$\frac{\pi q_0 E(e)}{a_1} \frac{B_1}{A_1 + B_1} = \frac{B_1}{K_M + K_H}, \quad (2.49)$$

враховуючи вираз для  $q_0$  і рівність  $a_1^2/b_1^2 = 1 - e_1^2$ , знаходимо довжини півосей площини контакту, що має форму еліптичного диска:

$$\left. \begin{aligned} b_1 &= \left( \frac{3PE(e_1)(K_M + K_H)}{2(1 - e_1^2)(A_1 + B_1)} \right)^{1/3}; \\ a_1 &= b_1 \sqrt{1 - e_1^2}, \end{aligned} \right\} \quad (2.50)$$

де  $K_M, K_3$  – фізичні характеристики матеріалу молотка і зернини;

$$\left. \begin{aligned} K_M &= \frac{1 - \nu_M^2}{\pi E_M}; \\ K_3 &= \frac{1 - \nu_3^2}{\pi E_3}, \end{aligned} \right\} \quad (2.51)$$

$E_M = 2 \cdot 10^6 \frac{\text{Н}}{\text{мм}^2}$  – модуль Юнга сталі;

$E_3 = 330 \frac{\text{Н}}{\text{мм}^2}$  – модуль Юнга зернини;

$\nu_M = 0,25$  – коефіцієнт Пуассона сталі;

$\nu_3 = 0,3$  – коефіцієнт поперечної деформації зернини.

Оскільки  $E_M$  більше від  $E_3$  майже у 6000 разів, то надалі в розрахунках параметром  $K_M$  молотка можна знехтувати.

З формули (2.50) видно, що площа контакту залежить і від сили  $F_2$ , і від геометричних параметрів тіл ( $A_1, B_1, C_1$ ), і від фізичних характеристик ( $K_M, K_3$ ). Унаслідок дії сили  $F_2$  тіла не тільки деформуються, а й переміщуються одне відносно іншого як жорстке тіло. Це переміщення  $\delta$ , м, можна знайти з рівності

$$\delta_{\text{гр}} = (K_M + K_3)\pi a_1 q_0 K(e_1). \quad (2.52)$$

Якщо врахувати вираз для  $q_0$  і формулу (2.45), то залежність між переміщенням  $\delta$  і силою  $F_2$  можна записати

$$\delta_{\text{гр}} = C_p F_2^{\frac{2}{3}}, \quad (2.53)$$

де

$$C_p = \left( \frac{9(1 - l_1^2)(A_1 + B_1)(K_M + K_3)^2 (K(e_1))^3}{4E(e_1)} \right)^{\frac{1}{3}}, \quad \left( \frac{\text{мм}}{H^{2/3}} \right).$$

Також можна записати

$$F_2 = C_\delta \delta^{\frac{3}{2}}, \quad (2.54)$$

де

$$C_\delta = \left( \frac{1}{C_p} \right)^{\frac{3}{2}} = \frac{2}{3(K_M + K_3)} \sqrt{\frac{E(e_1)}{(K(e_1))^3 (1 - e_1^2)(A_1 + B_2)}}, \quad \left( \frac{H}{\text{мм}^{3/2}} \right). \quad (2.55)$$

Звідси для трьох досліджуваних положень: для  $e_1 = 0,894$  –  $C_{\delta 1} = 376,1$ ,  $C_{p1} = 0,0192$ ; для  $e_2 = 0,946$  –  $C_{\delta 2} = 300,8$ ,  $C_{p2} = 0,0223$ ; для  $e_3 = 0,946$  –  $C_{\delta 3} = 120,13$ ,  $C_{p3} = 0,0411$ . Ці параметри необхідні для подальших обчислень.

## 2.6. Взаємодія зернини з робочими органами дробарки

Після початку контактної взаємодії зернини з площиною молотка розпочинається процес їх взаємного зближення. Оскільки жорсткість молотка набагато більша від жорсткості зернини, то відносне зближення  $\delta(t)$  відбувається внаслідок деформації зернини. Запишемо диференціальне рівняння зближення зернини і молотка

$$m \frac{d^2 \delta(t)}{dt^2} = -F_2, \quad (2.56)$$

де  $m$  – маса зернини, кг;

$F_2$  – сила контактної взаємодії зернини з молотком, Н.

Замість  $F_2$  підставимо вираз (2.54), а ліву частину запишемо у формі

$$\left. \begin{aligned} \frac{d^2 \delta_H}{dt^2} &= \frac{d\dot{\delta}_H}{dt} = \frac{d\delta_H}{dt} \cdot \frac{d\dot{\delta}_H}{d\delta_H} = \dot{\delta}_H \cdot \frac{d\dot{\delta}_H}{d\delta_H}; \\ \dot{\delta}_H &= \frac{d\delta_H}{dt}. \end{aligned} \right\} \quad (2.57)$$

Тоді рівняння (2.56) матиме вигляд

$$m \dot{\delta}_H \frac{d\dot{\delta}_H}{d\delta_H} = -C_\delta (\delta_H)^{\frac{3}{2}}. \quad (2.58)$$

У рівнянні (2.58) розділимо змінні й проведемо інтегрування, враховуючи при цьому, що в початковий момент часу при  $t = 0$ ,  $\delta_H = 0$  швидкість точки молотка, з якою починає контактувати зернина  $\dot{\delta}_H = V_0 = \omega R$ , а коли  $\delta$  досягне максимального значення ( $\delta_H = \delta_{max}$ ), то швидкість  $\dot{\delta}_H = 0$ :

$$\left. \begin{aligned} m \int_{V_0}^0 \dot{\delta} d\dot{\delta} &= -C_\delta \int_0^{\delta_{max}} (\delta)^{\frac{3}{2}} d\delta; \\ \frac{m}{2} (\dot{\delta})^2 \Big|_{V_0}^0 &= -C_\delta \cdot \frac{2}{5} \delta^{\frac{5}{2}} \Big|_0^{\delta_{max}}. \end{aligned} \right\} \quad (2.59)$$

Звідси одержуємо

$$\delta_{max} = \left( \frac{5 m V_0^2}{4 C_\delta} \right)^{\frac{2}{5}} = \left( \frac{5 m (\omega^2 R) R}{4 C_\delta} \right)^{\frac{2}{5}}. \quad (2.60)$$

Якщо ж у рівності (2.59) проводити інтегрування для довільного моменту часу ( $\delta < \delta_{max}$ ), то одержуємо співвідношення

$$\frac{m}{2} (V_0^2 - \dot{\delta}^2) = \frac{2}{5} C_\delta \delta^{\frac{5}{2}}. \quad (2.61)$$

Для визначення тривалості процесу, поки зближення  $\delta(t)$  змінюється від 0 до  $\delta_{max}$ , розв'яжемо (2.61) відносно  $\dot{\delta}$ :

$$\frac{d\delta}{dt} = \sqrt{V_0^2 - \frac{4 C_\delta}{5 m} \delta^{\frac{5}{2}}} = V_0 \sqrt{1 - \left( \frac{\delta}{\delta_{max}} \right)^{\frac{5}{2}}}. \quad (2.62)$$

Відокремимо змінні і проведемо інтегрування

$$t_1 = \frac{1}{V_0} \int_0^{\delta_{max}} \frac{d\delta}{\sqrt{1 - \left( \frac{\delta}{\delta_{max}} \right)^{\frac{5}{2}}}} = \frac{\delta_{max}}{V_0} \int_0^1 \frac{dx}{\sqrt{1 - x^{\frac{5}{2}}}}. \quad (2.63)$$

Останній означений інтеграл потрібно обчислювати чисельно, використовуючи, наприклад, метод трапецій [122]. У результаті одержуємо

$$t_1 = 1,47 \frac{\delta_{max}}{V_0}. \quad (2.64)$$

Якщо зближення  $\delta_{гр}$ , за якого відбувається руйнування зернини, менше від  $\delta_{max}$  ( $\delta_{гр} < \delta_{max}$ ), то час  $t_1$  знаходимо за формулою

$$t_1 = d_1 \frac{\delta_{max}}{\omega R}, \quad (2.65)$$

де  $d_1 = \int_0^{\frac{\delta_{гр}}{\delta_{max}}} \frac{dx}{\sqrt{1-x^2}}$  – коефіцієнт, значення якого знаходимо залежно від співвідношення  $\delta_{гр}/\delta_{max}$  (рис. 2.10)

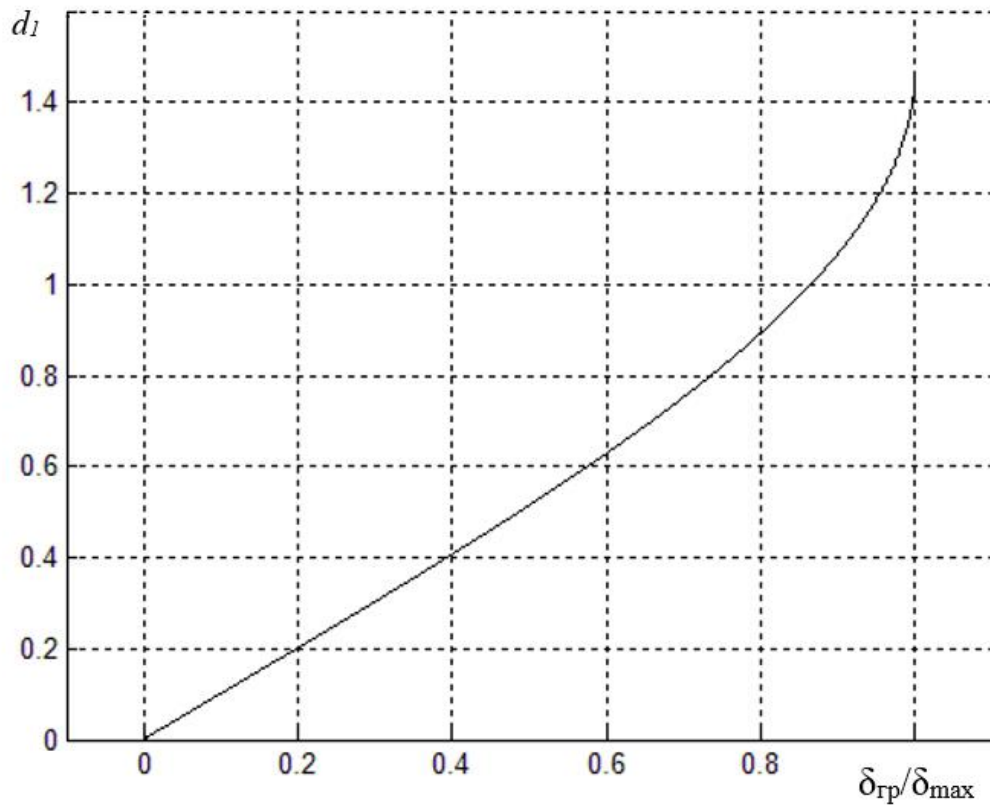


Рисунок 2.10 – Закономірність зміни коефіцієнта  $d_1$

Визначимо масу зернини  $m$ , яка входить у попередньо одержані формули. Для цього обчислимо спочатку об'єм  $V$  зернини, враховуючи рівняння (2.29) поверхні та її симетрію відносно координатних осей.

$$V_H = 8 \iint_{\Omega} z dx dy = 8 \iint_{\Omega} c \sqrt{1 - \frac{x^2}{a^2} - \frac{y^2}{b^2}} dx dy; \quad \left. \begin{array}{l} 0 \leq x \leq a; \\ 0 \leq y \leq b, \end{array} \right\} \quad (2.66)$$

де  $\Omega$  – площа четвертої частини еліптичного диска з півосями  $a$  і  $b$ ,  $m^2$ .

Цей інтеграл обчислюємо також заміною змінних формули (2.44), тільки кут  $\varphi_e$  змінюється в межах  $0 \leq \varphi_e \leq \pi/2$ .



Тоді об'єм дорівнює

$$V_H = 8 \frac{abc \pi^2}{2 \cdot 2 \cdot 3} = \frac{4}{3} \pi abc. \quad (2.67)$$

Обчислюємо масу зернини, прийнявши густину  $\rho = 1360 \text{ кг/м}^3 = 1,36 \cdot 10^{-6} \text{ кг/мм}^3$  [13]:

$$m = \rho V = 1,3 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{4}{3} \cdot 3,142 \cdot 3,3 \cdot 1,8 \cdot 1,4 = 4,528 \cdot 10^{-5} \text{ кг.}$$

Тепер можна обчислити і  $\delta_{max1} = 0,588$ , якщо  $e_1 = 0,894$ ;  $\delta_{max2} = 0,588$ , якщо  $e_2 = 0,946$ ;  $\delta_{max3} = 0,588$ , якщо  $e_2 = 0,946$ .

Молоток у поперечному перерізі має форму прямокутної трапеції, тобто одна грань молотка скошена під кутом  $0 \leq \alpha \leq 10^\circ$ . У зв'язку з цим між площиною пластини і скошеною гранню молотка утворюється щілина змінної ширини і зерна, яке потрапляє у цю щілину, руйнується. Якщо в деякий момент часу зернина торкнеться площин щілини, то час  $t_p$ , через який вона зазнає руйнування, можна знайти з рівності

$$\omega R t_p \operatorname{tg} \alpha = \delta_{гр}. \quad (2.68)$$

де  $\delta_{гр}$  – гранична деформація зернини, мм (визначається експериментально) [142], мм.

З (2.68) знаходимо

$$t_p = \frac{\delta_{гр}}{\omega R \operatorname{tg} \alpha} \quad (2.69)$$

На рис. 2.11 показано вплив на час руйнування зернини кута між боковими поверхнями нерухомо встановленої пластини та молотка, а також відстані від осі обертання до робочої зони молотка, якщо швидкість обертання ротора дробарки 314 рад/с (3000 об./хв); функція для розрахунку і побудови цього графіка наведена в дод. Г.

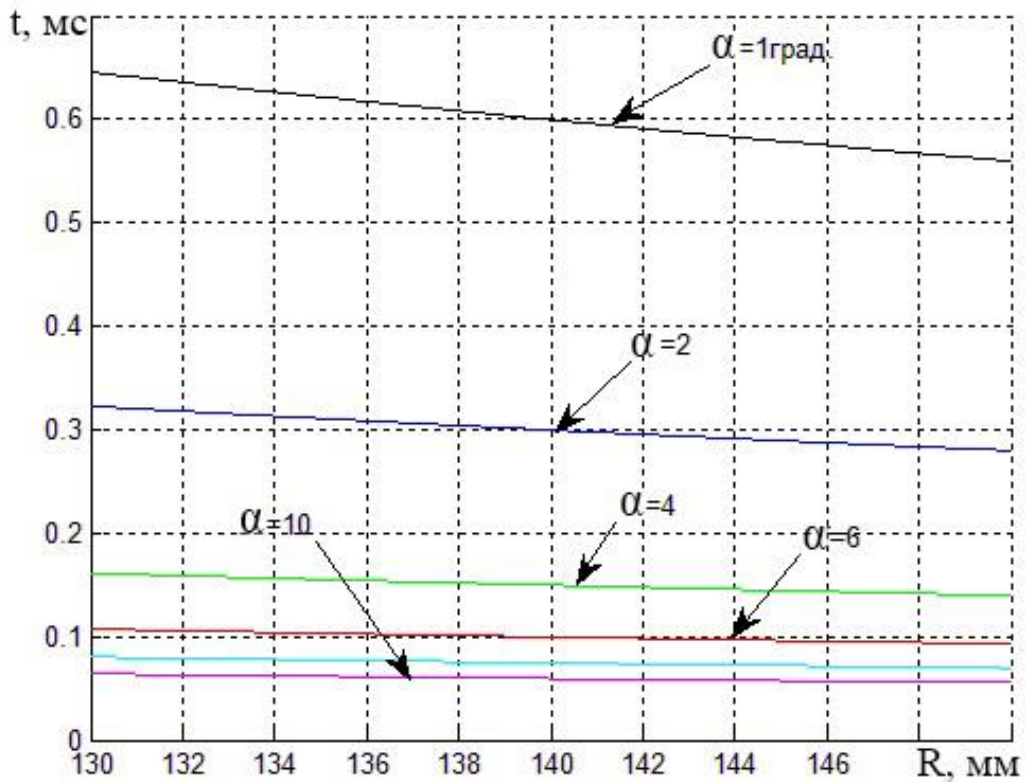


Рисунок 2.11 – Залежність часу руйнування  $t_p$  зернини від відстані між віссю обертання і робочою зоною молотка за різних значень кута:  $\alpha = 1, 2, 4, 6, 10$  град

Значний вплив на час руйнування зернини має саме зміна кута між боковими поверхнями нерухомо встановленої пластини та молотка. При зростанні кута  $\alpha$  до  $4-6^\circ$  час руйнування  $t_p$  різко зменшується, а з подальшим збільшенням кута  $\alpha$  теж зменшується, але повільніше. Незначний вплив на руйнування  $t_p$  мають також відстань від осі обертання до робочої зони молотка  $R$  та кутова швидкість обертання ротора  $\omega$ .

Оскільки щілина звужується, то деякі з частин зруйнованої зернини можуть і далі руйнуватися на дрібніші фракції, але ті частини зернини, що менші від зазору між нерухомою пластиною та молотком, не будуть надалі руйнуватися за рахунок їх заклинювання в цьому просторі.

## Висновки до 2 розділу

1. Для реалізації поставлених завдань запропоновано модернізувати молоткову дробарку загальновідомої схеми зміною форми молотків і встановленням у корпусі додаткових робочих органів у вигляді пластин, що мають форму сектора кільця.

2. За умови, що середній розмір зернини  $b_n$  або подрібнюваної частинки лежить у межах  $(k_{max} - \delta_{гр}) > b_n > k_{min}$ , під час відносного руху молотка вздовж пластини в результаті заклинювання зернини відбувається процес її руйнування з перетиранням.

3. Для гарантованого заклинювання зернини між молотком та нерухомою пластиною кут  $\alpha$  не повинен перевищувати  $33,39^\circ$ .

4. Якщо розмір зернини  $b_n$  або подрібнюваної частинки більший за початковий розмір  $k_{max}$  клиноподібного зазору між молотком та нерухомою пластиною, то зернина буде руйнуватися розколюванням.

5. Найбільш можлива теоретично-ймовірна заповненість зазору між молотком та нерухомо встановленою пластиною у кількості  $W = 8-9$  зернин буде в разі зазору  $k = 1,5-2$  мм та за мінімального кута нахилу бокової грані молотка  $\alpha = 3,5-4^\circ$ , подальше зменшення кута  $\alpha$  суттєво не впливає на кількість зерен через обмежену ширину молотка.

6. Розглянуто контактну взаємодію зернини з молотком у трьох можливих її розташуваннях, де площа контакту обмежена еліпсом, що збільшується зі збільшенням зусилля, що стискає зернину.

7. Отримані теоретичні залежності часу руйнування зернини від кута  $\alpha$  між боковими поверхнями нерухомо встановленої пластини і молотка та від відстані між віссю обертання і робочою зоною молотка  $R$ . Оптимальне значення цього кута становить близько  $6^\circ$ .

## РОЗДІЛ 3

### ПРОГРАМА І МЕТОДИКА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

Метою проведення експериментальних досліджень було отримання необхідних даних та закономірностей для математичного моделювання процесу подрібнення, вибір оптимальних конструктивних параметрів та режимів роботи молоткової дробарки, обґрунтування геометричних параметрів молотка, визначення енергоємності та якості процесу подрібнення (гранулометричного складу).

#### 3.1. Програма експериментальних досліджень

Відповідно до програми експериментальних досліджень було поставлено такі завдання:

- дослідити фізико-механічні властивості зернового матеріалу та встановити тенденції їхньої зміни;
- провести багатофакторний експеримент з визначення впливу конструктивних параметрів і режимів роботи малогабаритної зернової дробарки на продуктивність, енергоємність та якість процесу подрібнення;
- обґрунтувати на основі експериментальних досліджень рекомендовані параметри і режими роботи малогабаритної зернової дробарки.

#### 3.2. Методика дослідження фізико-механічних властивостей зерна

##### 3.2.1. Визначення розмірів зерен пшениці

Розміри зерен пшениці, а саме довжину –  $l_z$ , ширину –  $b_z$ , товщину –  $h_z$  (рис. 3.1) визначали за допомогою штангенциркуля ШЦЦ-І-150 (рис. 3.2) з ціною поділки 0,01мм.



Рисунок 3.1 – Розміри зерен пшениці



Рисунок 3.2 – Штангенциркуль ШЦЦ-I-150

Встановлені розміри зерен пшениці формувались у табличному вигляді (табл. 3.1). Далі визначали:

– середнє значення довжини  $\bar{l}_3$ , ширини  $\bar{b}_3$ , товщини  $\bar{h}_3$  за формулами:

$$\left. \begin{aligned} \bar{l}_3 &= \frac{\sum l_i}{n}; \\ \bar{b}_3 &= \frac{\sum b_i}{n}; \\ \bar{h}_3 &= \frac{\sum h_i}{n}; \end{aligned} \right\} , \quad (3.1)$$

де  $l_i, b_i, h_i$  – відповідно значення довжини, ширини, товщини, мм, у кожному окремому  $i$ -му замірі, кількість яких  $n$ ;

$\sigma_l, \sigma_b, \sigma_h$  – середньоквадратичні відхилення довжини, ширини і товщини:

$$\left. \begin{aligned} \sigma_l &= \pm \sqrt{\frac{\sum_1^n (\bar{l}_3 - l_i)^2}{n-1}}; \\ \sigma_b &= \pm \sqrt{\frac{\sum_1^n (\bar{b}_3 - b_i)^2}{n-1}}; \\ \sigma_h &= \pm \sqrt{\frac{\sum_1^n (\bar{h}_3 - h_i)^2}{n-1}}. \end{aligned} \right\} \quad (3.2)$$

$\vartheta_l, \vartheta_b, \vartheta_h$  – коефіцієнт варіації довжини, ширини, товщини:

$$\left. \begin{aligned} \vartheta_l &= \frac{\sigma_l}{\bar{l}_3}; \\ \vartheta_b &= \frac{\sigma_b}{\bar{b}_3}; \\ \vartheta_h &= \frac{\sigma_h}{\bar{h}_3}. \end{aligned} \right\} \quad (3.3)$$

Отримані дані розрахунку також формуємо в табличному вигляді (табл. 3.1).

Таблиця 3.1 – Результати статистичної обробки результатів

Параметр	Значення параметрів		
	середнє значення	середньоквадратичне відхилення, $\sigma$	Коефіцієнт варіації, $\vartheta$
Довжина, $l_3$ мм			
Ширина, $b_3$ мм			
Товщина, $h_3$ мм			

Коефіцієнт кореляції розраховували за такою формулою:

$$r_{xy} = \frac{\sum (x - M[x])(y - M[y])}{\sqrt{\sum (x - M[x])^2 \sum (y - M[y])^2}}, \quad (3.4)$$

де  $x, y$  – геометричні розміри (довжина, ширина або висота), мм;

$M[x], M[y]$  – теоретичне середнє значення розмірів  $x$  та  $y$  відповідно, мм.

### 3.2.2. Визначення відносної вологості зерен пшениці

Під час оцінки якості зерна пшениці суттєве значення має вологість, від якої залежать розміри зерен, коефіцієнт тертя ковзання, а також міцнісні характеристики зерна.

Відносну вологість визначали термогравіметричним методом за допомогою аналізатора вологості *Mettler Toledo HG 63* (рис. 3.3), технічна характеристика якого наведена в табл. 3.2.



Рисунок 3.3 – Загальний вигляд аналізатора вологості *Mettler Toledo HG 63*:

- 1 – ємність для досліджуваного матеріалу; 2 – панель керування;  
3 – нагрівальний елемент; 4 – дисплей

Таблиця 3.2. – Технічна характеристика вологоміра *Mettler Toledo HG 63*

№ з/п	Параметр	Значення
1	Точність вимірювання, %	0,01
2	Маса зразка, г	0,1 ... 61
3	Повторюваність замірів	0.05 % (2 г); 0.01 % (10 г)
4	Точність зважування, г	0,01
5	Температура нагріву, °C	40 ... 200
6	Час вимірювання, хв	0,5 ... 480
7	Обсяг пам'яті, кількість дослідів	10

Для визначення вологості в ємність 1 (див. рис. 3.3) поміщається порція досліджуваного матеріалу масою 2 г, після чого вмикається аналізатор 2. За декілька хвилин зразок нагрівається, а волога з досліджуваного зерна випаровується. Кількість випарованої води реєструється приладом і виводиться на дисплей 4. Відносна вологість визначається за формулою

$$\psi = \frac{m - m_c}{m} \cdot 100\%, \quad (3.5)$$

де  $m$  – маса зірця до сушіння, г;

$m_c$  – маса зірця після сушіння, г.

### 3.2.3. Визначення коефіцієнта форми зерен пшениці

Оберненим до коефіцієнта форми є такий параметр, як сферичність. За формою зерна пшениці (див. рис. 3.1) наближені до еліпсоїда (рис. 3.4).

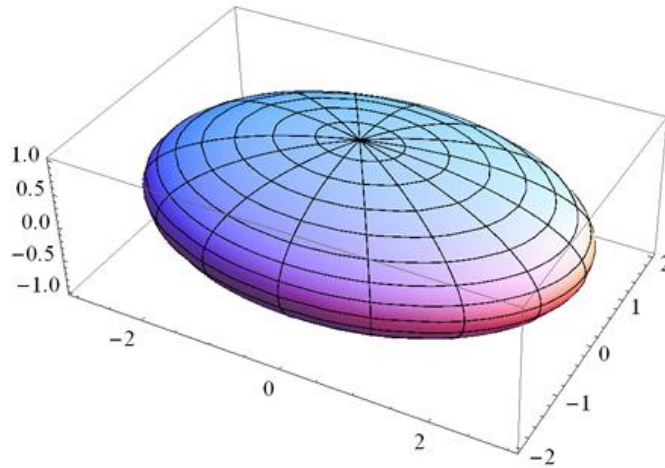


Рисунок 3.4 – Еліпсоїд

Площу еліпсоїда можна визначити за наближеною формулою [116]

$$S = 4\pi \left[ \frac{\left(\frac{l_3}{2}\right)^p \left(\frac{b_3}{2}\right)^p + \left(\frac{b_3}{2}\right)^p \left(\frac{h_3}{2}\right)^p + \left(\frac{h_3}{2}\right)^p \left(\frac{l_3}{2}\right)^p}{3} \right]^{1/p}, \quad (3.6)$$

де  $p$  – емпіричний коефіцієнт.



Встановлено [123], якщо прийняти  $p = 1,6075$ , максимальна відносна похибка розрахунків не буде перевищувати 1,061 %.

Об'єм зерен пшениці можна визначити за формулою об'єму еліпсоїда

$$V = 0,5 \left( \frac{4}{3} l_3 b_3 h_3 \right), \quad (3.7)$$

де  $l_3$ ,  $b_3$  і  $h_3$  – відповідно довжина, ширина і товщина зернини, мм.

### 3.2.4. Дослідження коефіцієнта і зовнішнього кута тертя зерен пшениці

Для дослідження коефіцієнта зовнішнього тертя були виготовлені взірці (рис. 3.5), які представляють собою дерев'яні дощечки розміром 70x70x16 мм з розміщеними на них зернинами озимої пшениці трьох сортів – Смуглянка, Зимоярка та Золотоколоса.

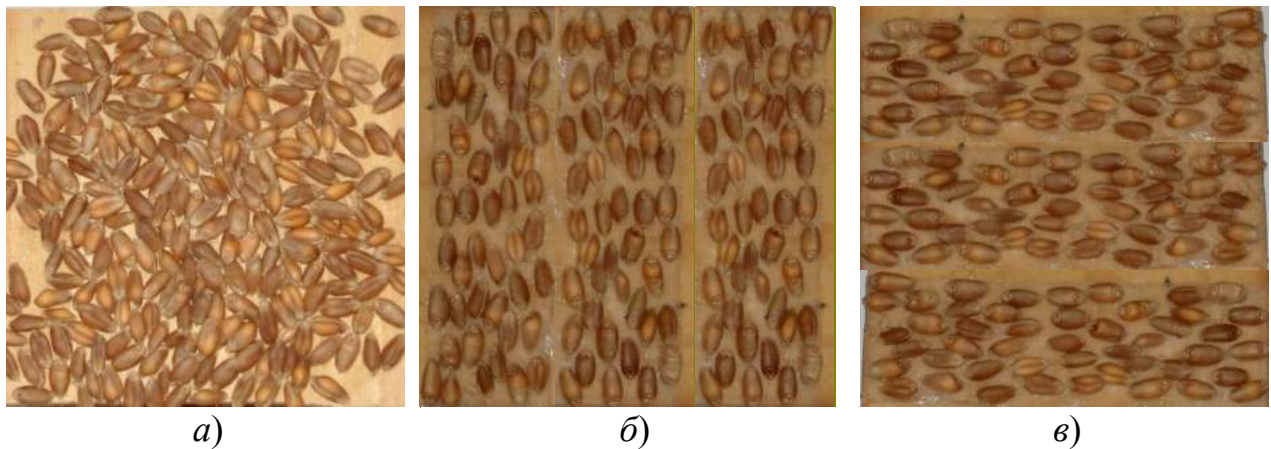


Рисунок 3.5 – Взірці для визначення коефіцієнта тертя для зерен пшениці сорту Смуглянка: *a* – довільне розміщення; *б* – вертикальне; *в* – горизонтальне

Під час переміщення тіла вагою  $G$  вздовж площини (рис. 3.6, а) під дією активної сили  $F_{ac}$  виникає сила опору ковзання тіла – сила тертя  $F_T$  (Н), напрямлена в сторону, протилежну до напрямку руху тіла

$$F_T = fN, \quad (3.8)$$

де  $N$  – нормальна сила, Н;

$f$  – коефіцієнт тертя.

Рівнодійна  $R$  сили тертя  $F_T$  та нормальної сили  $N$  відхиляється від нормалі на кут тертя  $\varphi_3$

$$\operatorname{tg} \varphi_3 = F_T/N, \quad (3.9)$$

тобто

$$\operatorname{tg} \varphi_3 = f. \quad (3.10)$$

Кут тертя – це такий граничний, найменший кут нахилу поверхні, за якого починається рух тіла вздовж цієї поверхні без дії на нього зовнішньої активної сили (рис. 3.6, б).

Сила, що спричинює рух тіла вздовж похилої площини  $G \sin \alpha$  за  $\alpha = \varphi_3$  буде рівнозначною до сили тертя.

$$G \sin \alpha = f G \cos \alpha = F_T. \quad (3.11)$$

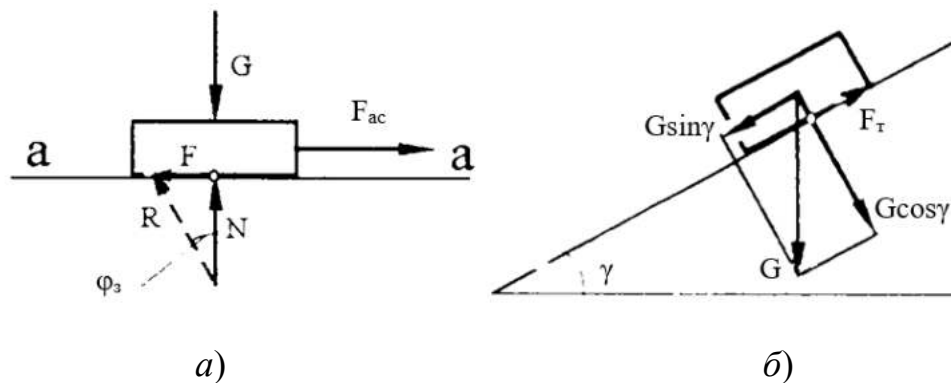


Рисунок 3.6 – Схема дії сил під час переміщення тіла по площинах:

$a$  – горизонтальній;  $b$  – нахилений під кутом  $\alpha$  до горизонту

Найпростішим приладом для визначення кута і коефіцієнта тертя може бути нахилена площина під кутом  $\gamma$ , який і буде рівним куту тертя (рис. 3.6, б).

Проте коефіцієнт тертя досліджували за відомою методикою на приладі, запропонованому В.О. Желіговським (рис. 3.7). Визначали напрям рівнодійної  $R$  від сили тертя  $F_T$  і нормальної реакції  $N$ , що дозволяє за допомогою побудови силового трикутника знайти кут  $\varphi_3$  і коефіцієнт тертя  $f$  [124].

На лінійці 1 цього приладу закріплюється досліджувана поверхня, наприклад, сталева пластина, а взірець з наклеєним зерном встановлюється на

каретці 2 (рис. 3.7, а). Довільно вибирається і фіксується кут  $\beta$  нахилу лінійки 1 (див. рис. 3.7) таким чином, щоб під час руху каретка 2 ковзала вздовж лінійки 1 з досліджуваним матеріалом. Ковзання каретки відбувається за умови

$$\beta = \pi/2 - \varphi_3. \quad (3.12)$$

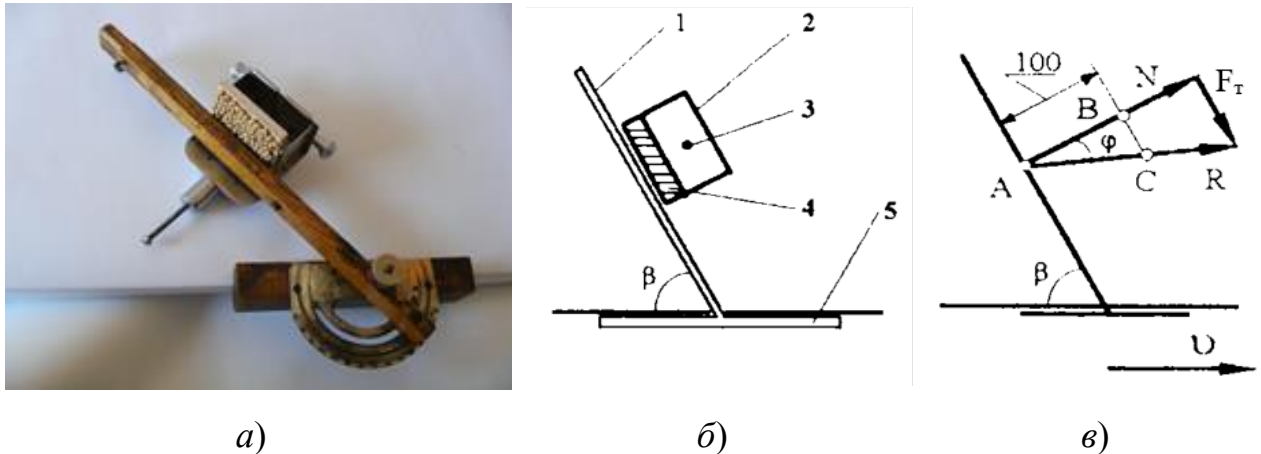


Рисунок 3.7 – Прилад В.О. Желіговського:  
 а – загальний вигляд; б – схема приладу; в) – схема сил:  
 1 – лінійка; 2 – каретка; 3 – самописець;  
 4 – взірець з наклеєним зерном; 5 – напрямна колодка

Привівши в дію прилад, олівець самописця каретки нарисує лінію рівнодійної сили  $R$ , яка відхиляється від нормалі до лінійки на кут тертя  $\varphi_3$  (див. рис.3.7).

Провівши з точки  $A$  до лінії ковзання нормаль, на якій для зручності обчислень відклали відрізок  $AB$ , рівний 100 мм, з точки  $B$  проводили до  $AB$  перпендикуляр  $BC$ , що пропорційний силі тертя. За побудовою трикутник  $ABC$  подібний силовому трикутнику  $ANR$ .

Коефіцієнт тертя  $f$  визначається зі співвідношення

$$f = \frac{BC}{100} = \operatorname{tg}\varphi_3. \quad (3.13)$$

Отримані дані оброблено методами математичної статистики, а результати показані у розділах 4.1 – 4.3.

### 3.2.5. Дослідження механічних властивостей зерен пшениці

Механічні властивості досліджували на установці *Lloyd LRX* (рис. 3.8) в лабораторії Інституту агрофізики Польської академії наук (м. Люблін, Польща). Схема навантаження зерна зображена на рис. 3.8.

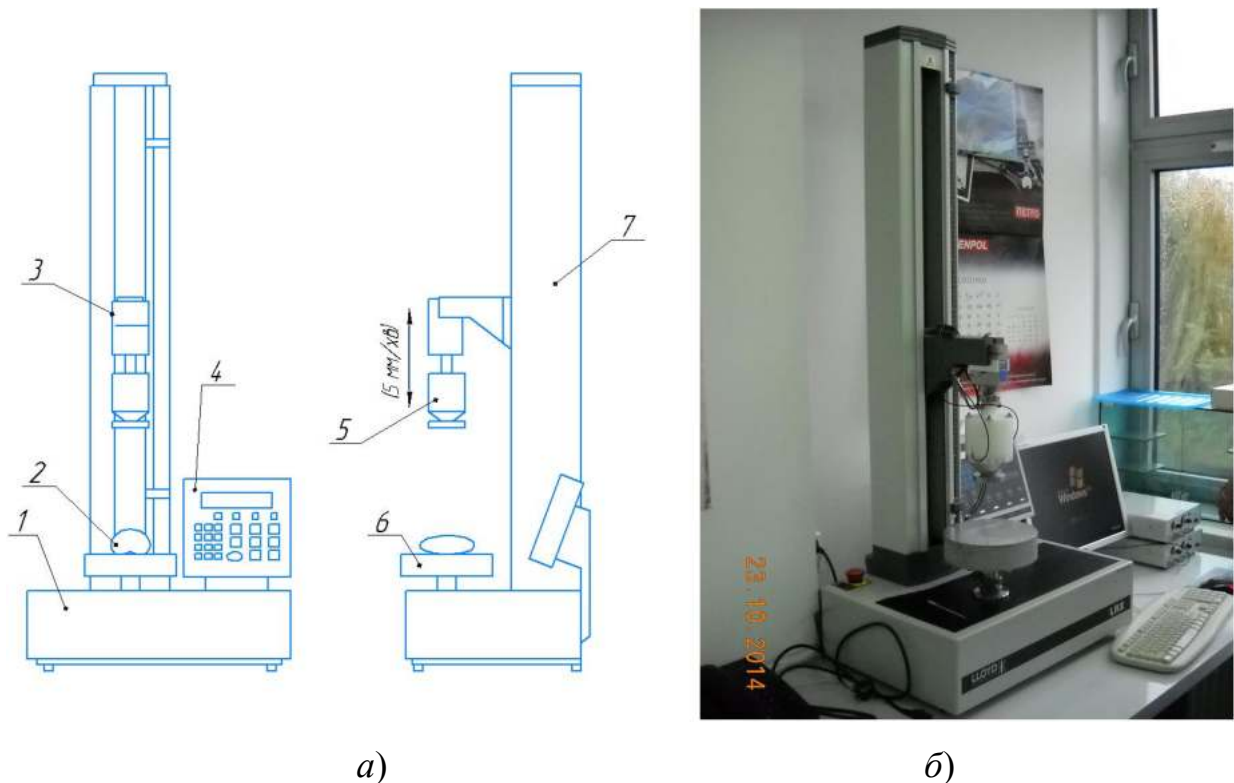


Рисунок 3.8 – Установка *Lloyd LRX* для визначення механічних властивостей зерна: *а* – схема установки; *б* – загальний вигляд; 1 – основа; 2 – зерно; 3 – каретка; 4 – панель управління; 5 – давач; 6 – стіл; 7 – напрямна

Дослідження проводили для п'яти значень вологості зерна пшениці за сталої швидкості навантаження 5 мм/хв.

Для дослідження зернина встановлювалася на стіл 6 (див. рис. 3.8), за допомогою спеціалізованого програмного забезпечення на персональному комп'ютері каретка 3 з давачем 5 підводилися до зернини, залишаючи зазор близько 1 мм. Тоді запускався процес вимірювання і каретка разом із давачем навантажували зернину (рис. 3.9).

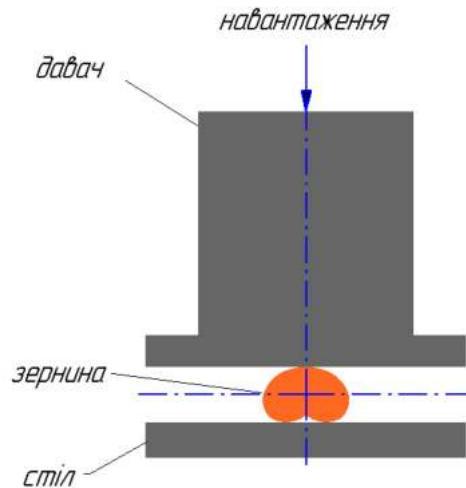


Рисунок 3.9 – Схема стискання горизонтально розміщеної зернини

Для кожного з досліджуваних значень відносної вологості було проведено 10 замірів. У результаті отримано масив даних для кожної дослідженої зернини, таких як: зусилля, робота і деформація руйнування, жорсткість та модуль Юнга зерна пшениці.

### 3.3. Будова та принцип роботи лабораторної установки

Малогабаритна молоткова дробарка комбінованої дії (рис. 3.10) містить завантажувальну 1 та вивантажувальну 2 горловини, корпус 3 з рифленою внутрішньою поверхнею 4, всередині якого знаходиться робоча камера 5 з ротором (рис. 3.11). Ротор складається з вала 6 з дисками 7, на яких за допомогою осей 8 шарнірно закріплені молотки 9. У нижній частині корпусу 3 міститься решето 10, а на внутрішній поверхні корпусу нерухомо закріплені набір пластин 11, розташованих на однаковій відстані між двома сусідніми молотками 9. Пластини мають форму сектора кільця. Рівномірне розміщення молотків відносно нерухомих пластин забезпечується за допомогою дистанційних втулок, на осі 8 між двома сусідніми молотками 9.

Молотки виконані зі змінною товщиною робочої частини, що збільшується у двох площинах: у радіальному напрямі – від центра до внутрішньої поверхні корпусу та в тангенціальному – протилежному до напрямку обертання молотка, а

на внутрішній поверхні корпусу додатково встановлені нерухомі пластини у формі сектора кільця [117–120]. Це сприяє інтенсифікації процесу подрібнення за рахунок додаткового процесу подрібнення, а саме перетирання подрібнюваного матеріалу, що потрапив у простір між молотком і пластиною, що, своєю чергою підвищує ефективність роботи малогабаритної молоткової дробарки комбінованої дії.

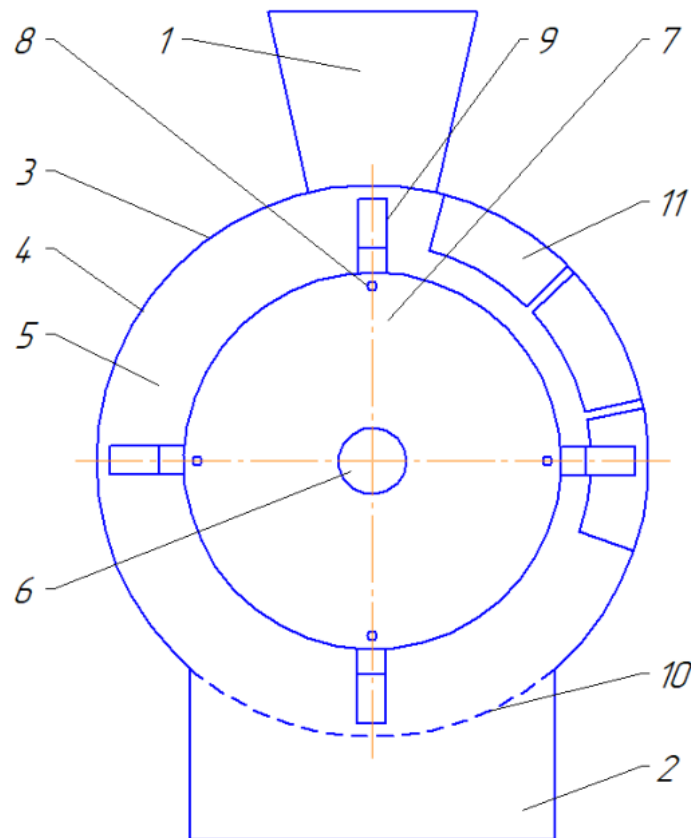


Рисунок 3.10 – Схема малогабаритної молоткової дробарки комбінованої дії:

- 1 – завантажувальна горловина; 2 – вивантажувальна горловина;
- 3 – корпус; 4 – рифлена внутрішня поверхня корпусу;
- 5 – робоча камера; 6 – вал; 7 – диск; 8 – вісь; 9 – молоток;
- 10 – решето; 11 – нерухомо встановлені пластини

Інші елементи (привід, пристрої керування та регулювання подачі сировини в робочу камеру тощо) виконані відповідно до відомих рішень і на рис. 3.10 не показані. Діаметр і ширина ротора дробарки становлять відповідно 300 мм і 47 мм.

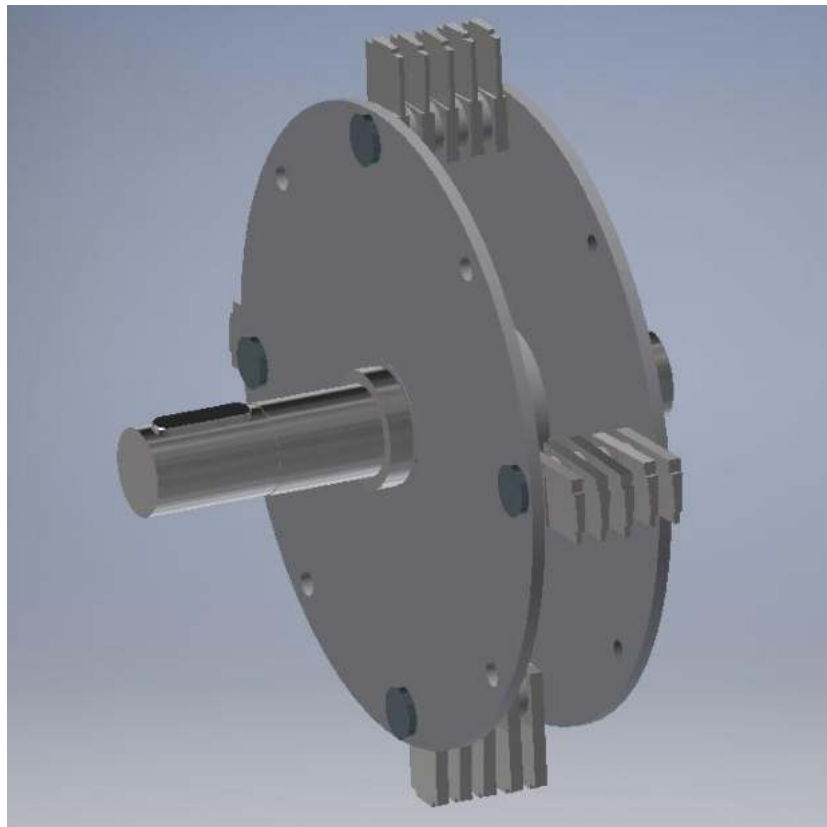


Рисунок 3.11 – Ротор молоткової зернової дробарки

На рис. 3.12 зображені тривимірні моделі нерухокої пластини у формі сектора (*a*) та молотка зі змінною товщиною робочої частини (*b*), що виготовлений з конструкційної ресорно-пружинної сталі 65Г.

Дробарка працює таким чином. Зерновий матеріал потрапляє в робочу камеру 5 (див. рис. 3.10) через завантажувальну горловину 1. Під час руху вала 6 обертаються диски 7 з молотками 9, які шарнірно закріплені на осях 8. Внаслідок удару молотком 9 зернини 13 частково руйнуються і відкидаються до рифленої поверхні 4, від удару з якою продовжується руйнування подрібнюваного матеріалу. Також зернини руйнуються, ударяючись об торець пластин 11.

Додатково відбувається процес руйнування подрібнюваного матеріалу, який потрапив у простір між боковими поверхнями молотка і нерухомо встановленої пластини в результаті відносного руху молотка вздовж пластини й заклинювання матеріалу з подальшим руйнуванням. Подрібнення таким чином буде відбуватися за умови, що середній розмір частинки подрібнюваного матеріалу більший за мінімальну відстань між молотком і пластиною.

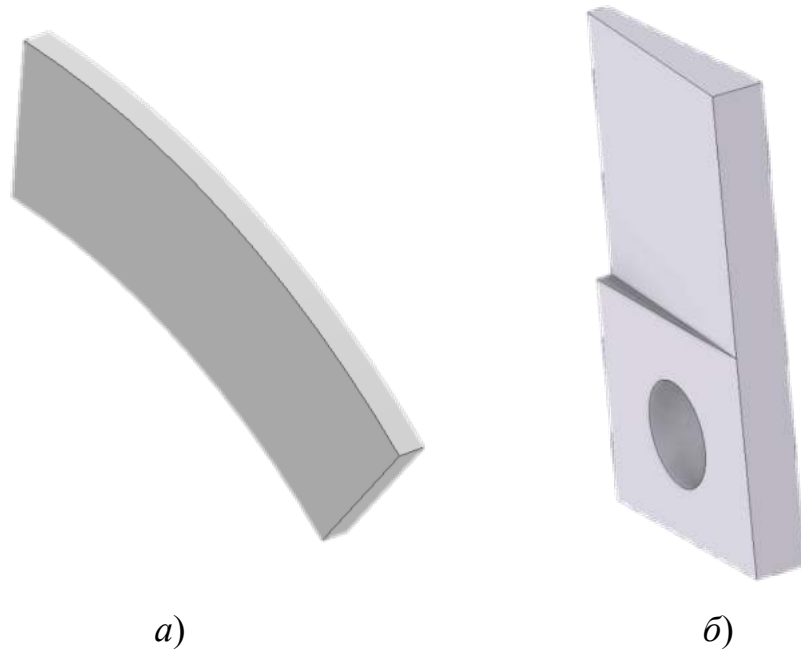


Рис. 3.12. Тривимірні моделі: *a* – нерухомо встановленої пластини;  
*б* – молотка зі змінною товщиною робочої частини

Подрібнення також здійснюється внаслідок взаємодії між зернинами та продуктами подрібнення, які просіваються крізь решето 10 і видаляються з дробарки через вивантажувальну горловину 2.

### 3.4. Стенд для проведення експериментальних досліджень

Для дослідження параметрів малогабаритної молоткової дробарки комбінованої дії розроблений апаратно-програмний комплекс, який дозволяє відображати і реєструвати миттєві значення й зміни споживаної потужності, обертів електродвигуна, а також продуктивності дробарки і обробляти результати вимірювань у реальному масштабі часу.

Для експериментальних досліджень як основу було використано спроектовану малогабаритну молоткову дробарку комбінованої дії, електродвигун, частотний перетворювач, персональний комп'ютер, давач напруги, плату *Arduino Uno* на базі мікроконтролера *ATmega328P*, давач струму, давач обертів і тензодавачі. Схема розробленого стенда зображена на рис. 3.13, а



загальний вигляд – на рис. 3.14.

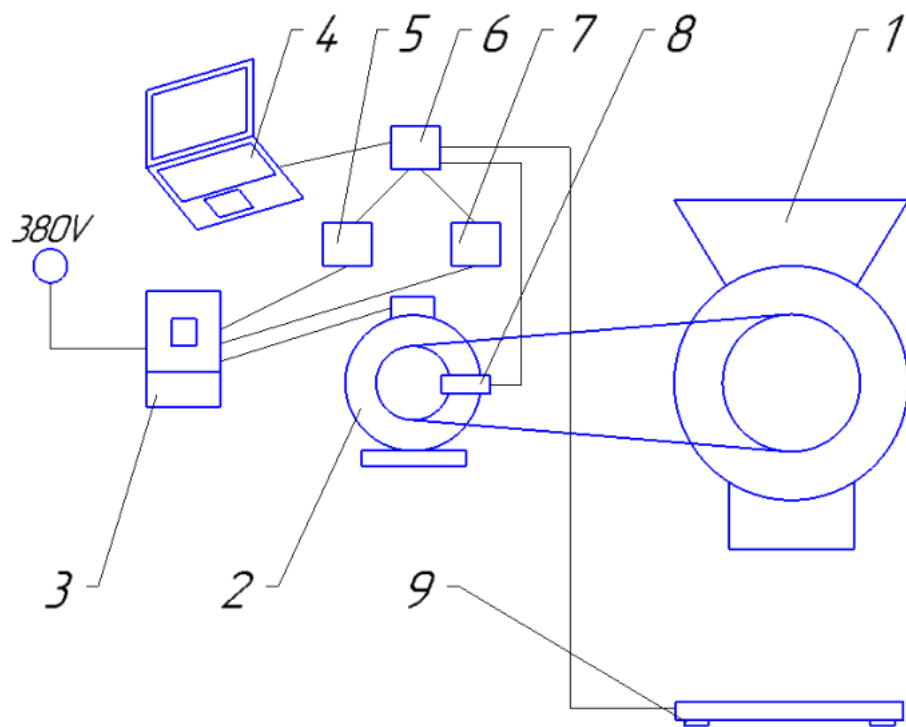


Рисунок 3.13 – Схема стенда для проведення експериментальних досліджень:

- 1 – малогабаритна молоткова дробарка комбінованої дії; 2 – електродвигун;  
 3 – частотний перетворювач; 4 – ПК; 5 – давач напруги; 6 – плата *Arduino Uno*;  
 7 – давач струму; 8 – давач обертів; 9 – тензодавачі



Рисунок 3.14 – Загальний вигляд стенда

Стенд (див. рис. 3.13, 3.14) складається з малогабаритної молоткової дробарки комбінованої дії 1, що розміщена на рамі й приводиться в рух за допомогою електродвигуна 2, оберти якого на різних режимах роботи змінюються частотним перетворювачем 3 марки *WEG CFW08* (дод. Е). Споживана потужність визначається за допомогою вимірювання струму і напруги на одній з фаз живлення електродвигуна. Для вимірювання струму використано аналоговий датчик *TA12-100*, що дозволяє вимірювати змінний струм від 0 до 5А. Також розроблено схему (рис. 3.15) з використанням діодного моста і оптопари *PC817* для безпечного підключення та вимірювання змінної напруги на одній з фаз електродвигуна за допомогою мікроконтролера.

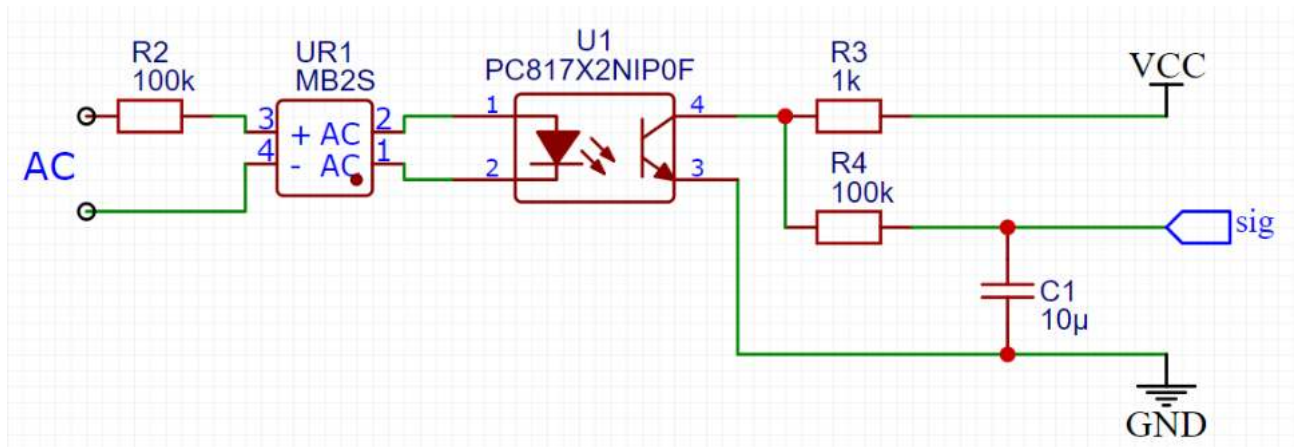


Рисунок 3.15 – Схема вимірювання змінної напруги

Для визначення обертів електродвигуна використано давач *KY-033* – це оптичний модуль, призначений для виявлення перешкод у вигляді білих або чорних ліній. Основним його елементом є оптопара *TCRT5000*, що складається з інфрачервоного світлодіода і фототранзистора. Зробивши на шківі чорну мітку та встановивши навпроти неї датчик *KY-033*, можна фіксувати час, за який двигун виконає один повний оберт.

Миттєве значення продуктивності визначало чотирьма напівмостовими тензодавачами, що з'єднані у мостову схему (рис. 3.16). Для роботи з цими тензодавачами задіяна спеціалізована мікросхема *HX711*, яка має АЦП з роздільною здатністю 24 біт, завдяки чому забезпечується висока точність

вимірювань. Модуль працює з частотою вимірювання 80 Гц та забезпечує коефіцієнт підсилення 32, 64 або 128.

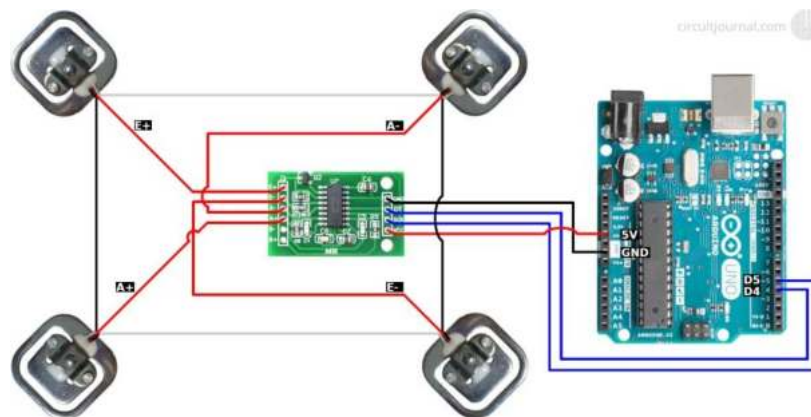


Рисунок 3.16 – Схема під'єднання тензодавачів через мостову схему до модуля *HX711*

Вирішення завдання щодо під'єднання нестандартних приладів до ПК індивідуальне для кожного випадку, але існує декілька загальних підходів [125]. Насамперед ПК повинен бути оснащений пристроєм вводу/виводу аналогово-цифрової інформації. Підключення вимірювальних приладів може здійснюватись за допомогою плати (*DAQ*-плата) промислового виготовлення, що встановлюється у спеціальний слот ПК, або ж модулів віддаленого вводу/виводу (наприклад, серії *I-7000* фірм *ICP DAS* або *ADAM - 5000* фірми *Advantech*). Автоматизована вимірювальна система може бути виконана на основі послідовного інтерфейсу *RS - 485*.

Для розроблення програмного забезпечення використана алгоритмічна мова графічного програмування у середовищі *LabVIEW* [126], яка має низку переваг: простота освоєння для непрофесійних програмістів і висока швидкість створення програм; наявність широкого спектра отримання, оброблення, зберігання і візуалізації вимірюваної інформації; можливість роботи з драйверами різних пристроїв, розроблених у вигляді бібліотек *DLL*, що динамічно підключаються, а також використання елементів *ActiveX*; підтримка стандартних інтерфейсів ПК і можливість простого вводу/виводу цифрових

даних через *USB* порт (аналогічно до функцій мови програмування *C inport* і *outport*).

Для комутації сигналів від датчиків до програми, створеної у середовищі *LabVIEW*, використано електронну платформу прототипування з відкритим кодом – *Arduino*, а саме плату *Arduino Uno R3* на базі 8-бітного *AVR* мікроконтролера *ATmega328P*. На платі знаходиться 14 цифрових, а також 6 аналогових входів/виходів.

Загальний вигляд пристрою поданий на рис. 3.17, а його структурна схема наведена в додатку Е [127].



Рисунок 3.17 – Загальний вигляд плати Arduino UNO

Ввід/вивід сигналів програмної частини вимірювального комплексу здійснюється через послідовний порт (*UART*).

На фронтальній панелі віртуальних приладів (рис. 3.18), що являє собою екранний інтерфейс, встановлюються прилади відображення інформації та управління процесом вимірювання, а на блок-діаграмі, яка є програмною частиною системи, відображено необхідний набір віртуальних приладів (ВП) та здійснено з'єднання їх у вимірювальну систему, яка забезпечує необхідні функції.

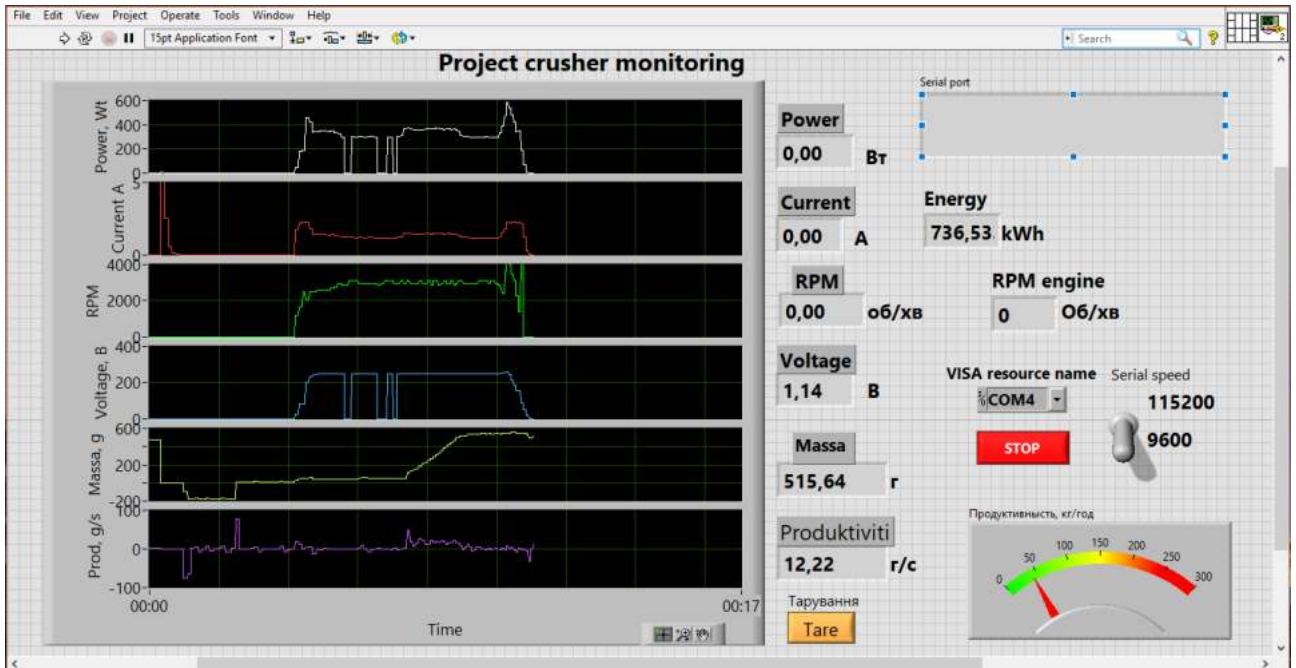


Рисунок 3.18 – Робоче вікно монітора ПК для експериментального дослідження параметрів роботи малогабаритної молоткової дробарки комбінованої дії

Вхідними сигналами, що надходять до вимірювальної системи, є сигнали від датчиків струму, напруги, обертів та від тензодатчиків.

Програмну частину комплексу для дослідження малогабаритної молоткової дробарки комбінованої дії забезпечує програмний комплекс *LabVIEW* фірми *National Instruments*. Розробку програмного забезпечення проводили в даному середовищі із застосуванням прикладів програмування на *LabVIEW* [125, 126].

Функціональні взаємозв'язки між елементами і панель блок-діаграми віртуального осцилографа зображено на рис. 3.19.

Було проведено калібрування показників усіх датчиків за допомогою порівняння їхніх значень із показниками еталонних приладів. Зокрема, вимірювання струму проводили спеціальними кліщами, напруги – за допомогою вольтметра, датчик обертів – лазерним тахометром. Калібрування тензодатчиків проводилося з використанням спеціального програмного коду та еталонної ваги з діапазоном вимірювання 0–500 г, у результаті чого отримано калібрувальний





режимів роботи проводили методом планування експерименту, який дозволяє скоротити час і затрати на його проведення, а також підвищує продуктивність праці дослідника [128].

У загальному випадку моделлю, яка описує об'єкт дослідження, є «чорний ящик» (рис. 3.20); цей термін введений у кібернетиці для вивчення складних процесів. Об'єкт дослідження зображено прямокутником. Позначені стрілками виходи з прямокутника означають параметри оптимізації, а стрілки, що входять у прямокутник, – входи або фактори [128].

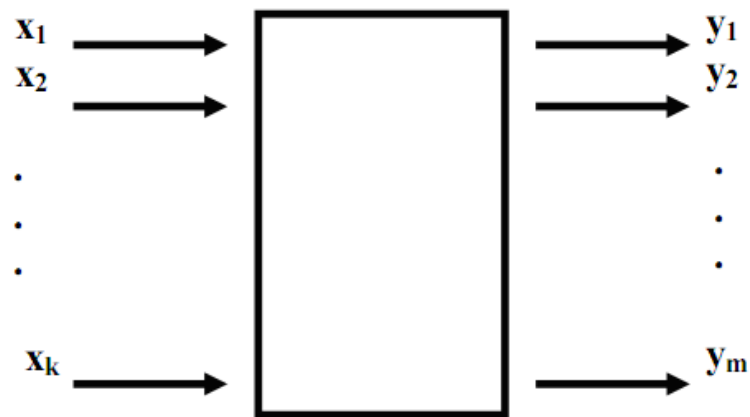


Рисунок 3.20 – Схема чорного ящика

Перед проведенням досліджень необхідно побудувати матрицю планування експерименту. У загальному випадку експеримент, в якому досліджуються всі можливі поєднання рівнів факторів, називають повним факторним, а кількість дослідів, необхідних для його проведення  $N$ , становить

$$N = n^k p, \quad (3.14)$$

де  $n$  – кількість рівнів варіювання;

$k$  – число факторів;

$p$  – кількість повторень.

Метою проведення багатофакторного експерименту було дослідження вплив регульованих параметрів процесу подрібнення частоти обертання ротора  $n$ , об/хв, зазору між молотком і нерухою пластинною  $k$ , мм та кута

заклинювання зернини  $\alpha$ , град. – на якісні показники роботи молоткової дробарки, які визначались продуктивністю дробарки  $Q$ , (кг/год), спожитою потужністю  $N$  (кВт) та якістю подрібнення.

Експерименти здійснювали з використанням зерна озимої пшениці сорту Смуглянка вологістю 14,1 %. У процесі досліджень почергово встановлювали значення регульованих параметрів процесу подрібнення, визначені планом експерименту. З отриманого в результаті подрібнення зернового матеріалу відбирали проби масою по 150 г для визначення гранулометричного складу.

Щоб фактори оптимізації описувалися поліномом другого порядку, необхідно їх варіювати мінімум на трьох рівнях. Тоді для досліджень трьох факторів за трикратних повторень необхідно виконати 81 дослід. Симетричний некомпозиційний план другого порядку Бокса-Бенкіна дав змогу зменшити кількість дослідів до 15 [129; 130]. Завдяки цьому під час математичного планування багатофакторного експерименту було отримано поверхні відгуку впливу досліджуваних параметрів, що можуть бути описані у вигляді

$$\left. \begin{aligned} y_1 &= f \cdot (x_1, x_2, x_3); \\ y_2 &= f \cdot (x_1, x_2, x_3); \\ y_3 &= f \cdot (x_1, x_2, x_3), \end{aligned} \right\} \quad (3.15)$$

де  $y_1, y_2, y_3$  – відповідно продуктивність, спожита потужність, якість подрібнення;

$x_1, x_2, x_3$  – кодовані значення відповідно частоти обертання ротора дробарки, зазору між молотком і нерухомою пластиною та кута заклинювання зернини.

Параметри в даному випадку варіюють на трьох рівнях  $0; \pm 1$ , а план являє собою комбінації дворівневих  $(-1, 0, +1)$  повних факторних експериментів з неповноблочними збалансованими планами.

Результати експерименту найчастіше описуються математичною моделлю у вигляді полінома, що називається рівнянням регресії. Для три-факторного експерименту повне квадратне рівняння матиме вигляд

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_{12}x_1x_2 + b_{13}x_1x_3 + b_{23}x_2x_3 + b_{11}x_1^2 + b_{22}x_2^2 + b_{33}x_3^2, \quad (3.16)$$



де  $b_0, b_1, b_2, b_3$  – коефіцієнти за відповідних значень  $x$ .

З метою переведення натуральних значень у безрозмірні величини проводились кодування параметрів. Зв'язок між кодованими  $x_i$  та натуральними  $X_i$  їх значеннями буде:

$$x_1 = \frac{X_1 - X_{10}}{\Delta X_1}; \quad x_2 = \frac{X_2 - X_{20}}{\Delta X_2}; \quad x_3 = \frac{X_3 - X_{30}}{\Delta X_3}, \quad (3.17)$$

де  $X_1, X_2, X_3$  – натуральні значення частоти обертання ротора дробарки, зазору між молотком і нерухомою пластиною та кута між ними;

$X_{10}, X_{20}, X_{30}$  – натуральні значення параметрів  $X_1, X_2, X_3$  на нульовому рівні;

$\Delta X_1, \Delta X_2, \Delta X_3$  – інтервал варіювання параметрів  $X_1, X_2, X_3$ .

Нульовим називається рівень, що займає центр інтервалу, тобто середнє значення інтервалу варіювання фактору. Нульовим рівням досліджуваних факторів відповідатимуть такі значення: частоти обертання ротора дробарки  $X_{10} = 3000$  об./хв, зазору між молотком і нерухомою пластиною  $X_{20} = 2$  мм, кута заклинювання зернини  $X_{30} = 6,7^\circ$ . Результати їх кодування наведені в табл. 3.3.

Таблиця 3.3. – Інтервали та рівні варіювання факторів

Фактори та їх позначення	Натуральне	Кодоване	Рівень варіювання факторів			Інтервал варіювання
			нижній	верхній	основний	
Частота обертання ротора дробарки, об./хв	$X_1$	$x_1$	2500	3500	3000	500
Зазор між молотком і нерухомою пластиною, мм	$X_2$	$x_2$	1	3	2	1
Кут між молотком і нерухомою пластиною, град.	$X_3$	$x_3$	3,4	10	6,7	3,3

Для знаходження коефіцієнтів полінома [129; 130] використовувався трирівневий план другого порядку Бокса-Бенкіна (табл. 3.7). Для того щоб визначити коефіцієнти полінома за умовами даного плану, проведено багатофакторний експеримент із п'ятнадцяти дослідів. План-матриця експерименту відображена в табл. 3.4.

Таблиця 3.4 – Матриця планування експерименту

№ досліду	Кодовані значення факторів		
	$x_1$	$x_2$	$x_3$
1	-1	-1	0
2	1	-1	0
3	-1	1	0
4	1	1	0
5	-1	0	-1
6	1	0	-1
7	-1	0	1
8	1	0	1
9	0	-1	-1
10	0	1	-1
11	0	-1	1
12	0	1	1
13	0	0	0
14	0	0	0
15	0	0	0

Отримані дані за результатами експериментів підтверджували їх відтворюваність за допомогою визначення однойменної дисперсії. Відтворюваність дослідів перевіряли за критерієм Кохрена [128; 131], згідно з яким гіпотеза відтворюваності дослідів приймалась, якщо розрахункове значення  $G_p$  критерію було менше від його табличного значення, тобто

$$G_p \leq G_T(0,05; n; f_i), \quad (3.18)$$

де  $0,05$  – 5-відсотковий рівень значущості;

$n$  – загальна кількість незалежних дисперсій (кількість дослідів);

$f_i$  – число ступенів вільності кожної з них.

Розрахункове значення  $G_p$  критерію Кохрена визначали за формулою

$$G_p = \frac{S_{i\max}^2}{\sum_{i=1}^n S_i^2}, \quad (3.19)$$

де  $S_i^2$  – дисперсія відтворюваності  $i$ -го незалежного дослідів;

$S_{i\max}^2$  – максимальне значення дисперсії відтворюваності з усіх дослідів.

Дисперсія відтворюваності за кожним із дослідів становить:

$$S_i^2 = \frac{1}{k-1} \sum_{i=1}^k (y_{uik} - \bar{y}_u)^2, \quad (3.20)$$

де  $i_k$  – номер повторюваності;

$y_{uik}$  – вихідний параметр за  $i_k$  повторюваності;

$\bar{y}_u$  – середнє арифметичне значення вихідного параметра в  $u$ -му досліді.

Результати розрахунків відображені в підрозділі 4.6 (с. 129).

Коефіцієнти регресії визначали за залежностями:

$$\left. \begin{aligned} b_0 &= \frac{1}{n} \sum_{u=1}^n \bar{y}_u; \\ b_1 &= \frac{1}{n} \sum_{u=1}^n x_{iu} \bar{y}_u; \\ b_{ij} &= \frac{1}{n} \sum_{u=1}^n x_{iu} x_{ju} \bar{y}_u, \end{aligned} \right\}, \quad (3.21)$$

де  $x_{iu}$ ,  $x_{ju}$  – відповідно значення  $i$ -го та  $j$ -го кодованого фактору в рядку матриці в  $u$ -му досліді.

Розрахунки, проведені за формулами (3.21), представлені в підрозділі 4.6, їх виконано в програмному середовищі *Microsoft Office Excel*.

Значення вихідного параметра  $\bar{y}_u$  отримані в результаті розрахунків

$$\bar{y}_u = \frac{1}{3}(y_{u_1} + y_{u_2} + y_{u_3}), \quad (3.22)$$

де  $y_{ui}$  – отримані в результаті дослідів величини вихідного параметра.

Перевірка адекватності здійснена за критерієм Фішера  $F_\phi$  [131].

Умова адекватності

$$F_\phi = \frac{S_{ad}^2}{S_y^2} < F_\phi(0,05; f_{ad}; f_y), \quad (3.23)$$

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

$F_\phi = (0,05)$  – критерій Фішера при 5-відсотковому рівні значущості;

$f_{ad}$  – число ступенів вільності дисперсії адекватності;

$f_y$  – число ступенів вільності дисперсії відтворюваності.

$$f_{ad} = n - k - 1, \quad (3.24)$$

де  $k$  – число факторів.

$$f_y = n(m_0 - 1), \quad (3.25)$$

де  $m_0$  – кількість повторень.

Дисперсію адекватності  $S_{ad}^2$  розраховували за формулою

$$S_{ad}^2 = \frac{1}{n - k - 1} \sum_{u=1}^n (y - \bar{y}_u)^2, \quad (3.26)$$

де  $y$  – розрахункове значення відгуку.

Зерно пшениці попередньо було очищене від органічних та неорганічних домішок. З отриманого подрібненого зернового матеріалу відбирали проби по 150 г для визначення параметрів якості помелу. Дослід повторювали тричі, при кожному зазорі між молотком і пластиною, куті між ними та частоті обертання ротора дробарки.

Результати досліджень наведені в підрозділі 4.6.

### 3.6. Вимірювання розміру подрібнених частинок

Для аналізу розміру частинок було відібрано 35 зразків зерна пшениці масою близько 150 г, подрібнених на різних режимах.

Відібрані зразки піддавали аналізу розміру частинок для оцінки ефективності подрібнення за показниками якості продукції. Основним пунктом дослідження зразків подрібнених зерен пшениці був аналіз розміру та форми частинок за допомогою цифрового оброблення зображень на пристрої *Retsch Camsizer*. Для кожного зі зразків був визначений характерний розмір  $d_{90\%}$  – діаметр отворів сита, через які проходить 90 % обсягу досліджуваних зерен. На рис. 3.21 показаний план досліджень розмірів і форми частинок пшениці після подрібнення.

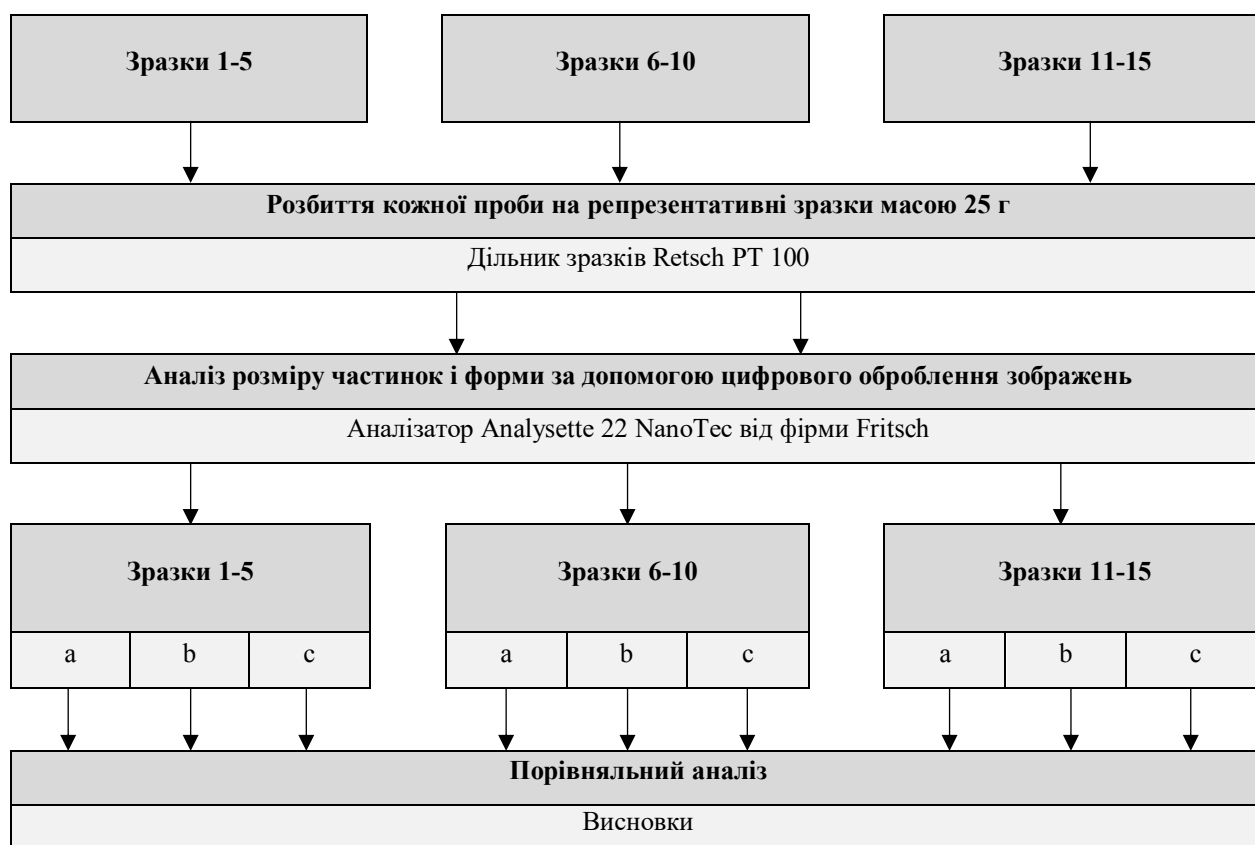


Рисунок 3.21 – План дослідження аналізованих параметрів подрібненого зерна: *a*, *b*, *c* – відповідно повторення 1, 2, 3

Усі зразки для досліджень були герметично запаковані. Кожна упаковка мала маркування найважливішої інформації про режими подрібнення. З кожної проби було відібрано три менші репрезентативні зразки масою 25 г, надалі іменовані як копії. Для цього було використано дільник зразків *Retsch PT 100* (рис. 3.22).

Використання поворотного дільника гарантує отримання репрезентативної проби, а головне – аналіз проводиться повторюваним чином. Зразок розділяється так, що процентний вміст окремих фракцій після поділу такий самий, як у вихідному матеріалі. Така дія є гарантією дуже якісного поділу, а також повторюваності результатів як для дуже тонких, так і для грубозернистих матеріалів, що подаються і розподіляються автоматично без перерв та відходів матеріалу.



Рисунок 3.22 – Зразковий дільник *Retsch PT 100*

Подрібнений матеріал піддавали аналізу розміру частинок і форми за допомогою цифрового оброблення зображень. Для цього було використано прилад *Retsch CAMSIZER*, встановлений у лабораторії дослідження дроблення на факультеті машинобудування Університету технології і наук про життя в Бидгощі, Польща (рис. 3.23).

*CAMSIZER* – це компактний лабораторний прилад, який дозволяє одночасно визначати розмір, форму, кількість та щільність подрібнених частинок до 30 мм. Оскільки всі частинки скануються і прилад працює за сучасним алгоритмом вимірювання, результати на 100 % збіжні з результатами аналізу на ситі. Час вимірювання дуже малий, і пристрій характеризується високою точністю й повторюваністю. Вимірювання включають 60 зображень із понад 780 000 точок сканування, що означає понад 45 мільйонів точок для аналізу за секунду і відповідає ISO 13322-2: 2006 [132].

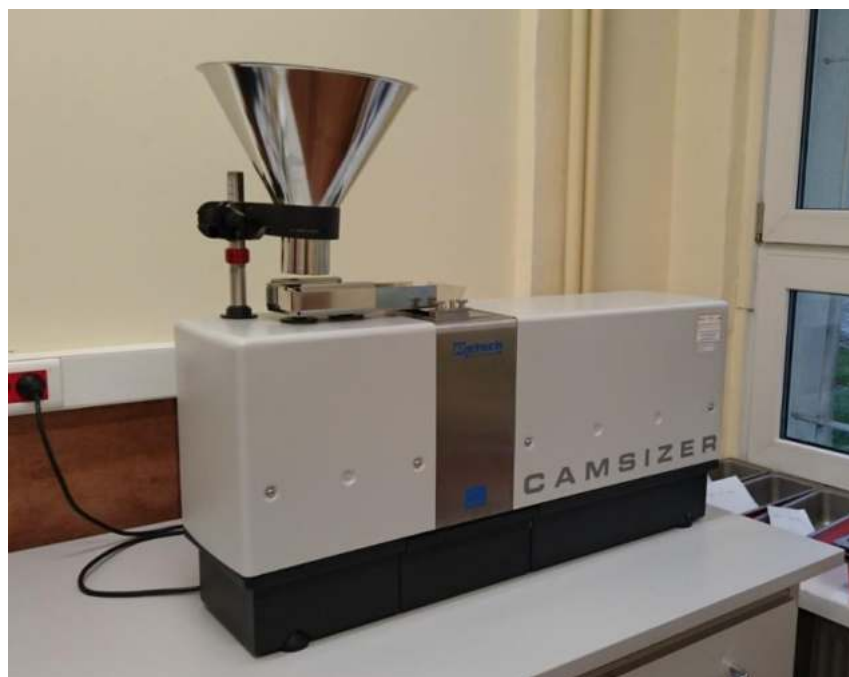


Рисунок 3.23 – Пристрій *Retsch CAMSIZER*

У пристрої вібраційний живильник подає зразок до вимірювального поля, де потік частинок переміщається між розсіяним джерелом світла та двома *CCD* камерами, реєструється зі швидкістю понад 60 кадрів за секунду і одночасно

аналізується. Можна вимірювати частинки в широкому діапазоні, не потребуючи перемикання вимірювальних діапазонів або внесення коректив. Завдяки системі з двох камер забезпечується велика глибина різкості й максимальна точність у всьому діапазоні вимірювань. Камера масштабування дозволяє досягти максимальної роздільної здатності найтонших частинок, а основна камера записує більші частинки і гарантує високу статистичну достовірність отриманих результатів (рис. 3.24).

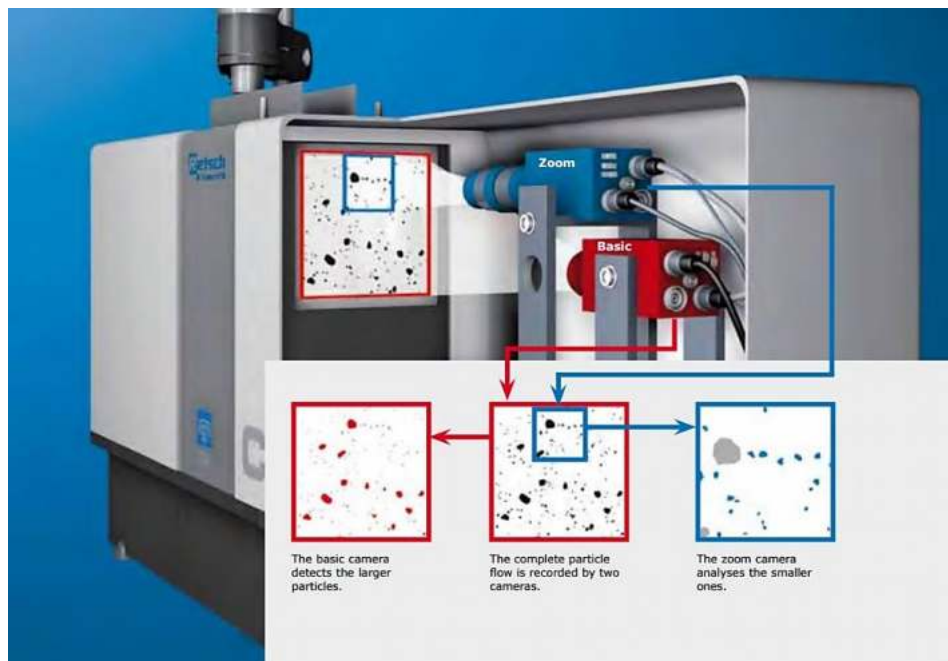


Рисунок 3.24 – Принцип роботи CAMSIZER

*CAMSIZER* характеризується зразковою повторюваністю результатів вимірювань, навіть якщо зразок матеріалу зовсім невеликий. Результати зберігаються в 300 розмірних класах [133].

Дослідження гранулометричного складу подрібненого зерна проводили визначенням характеристик ситового аналізу за допомогою ПЗ *Analysette 22 NanoTec*.

У результаті аналізу розподілу частинок за розміром визначено:

- $x_{c \min}$  – діаметр (ширину) частинок, що є найкоротшою хордою із вимірюного набору максимальних хорд (рис. 3.25);



- $Q_3(x)$  – кумулятивний розподіл (% проходження) на основі об'єму, об'ємну частку частинок, меншу за  $x$  пропорційно загальному об'єму;

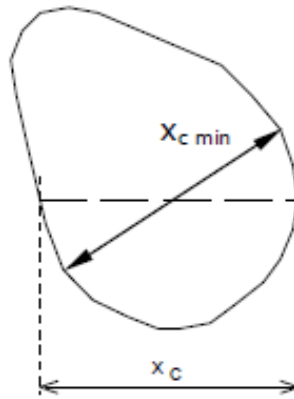


Рисунок 3.25 – Схема вимірювання частинки:

$x_c$  – максимальний розмір у напрямі вимірювання;

$x_{c \min}$  – діаметр, аналогічний екранованому розміру.

- $p_3(x_1, x_2)$  – об'ємну частку частинок у межах  $(x_1, x_2)$ , визначається із залежностей

$$p_3(x_1, x_2) = Q_3(x_2) - Q_3(x_1); \quad (3.27)$$

- $q_3(x)$  – розподіл щільності, частоти появи частинок залежно від об'єму як похідну  $Q_3(x)$

$$q_3(x) = \frac{dQ_3(x)}{dx}. \quad (3.28)$$

### Висновки до 3 розділу

1. Розроблена молоткова дробарка комбінованої дії з додатково встановленими пластинами, виконаними у формі сектора кільця, і молотками із змінною товщиною робочої частини, що збільшується в двох площинах: в радіальному напрямку – від центра до внутрішньої поверхні корпусу, та в тангенціальному - протилежному до напрямку обертання молотка, а зазор між молотком і пластиною відповідно зменшується. Це сприяє інтенсифікації процесу подрібнення за рахунок додаткового подрібнення, а саме – перетирання подрібнюваного матеріалу, що потрапив у простір між молотком і пластиною, внаслідок чого підвищується ефективність роботи малогабаритної молоткової дробарки комбінованої дії.
2. Дослідження фізико-механічних властивостей зерна пшениці дозволило сформулювати вихідні дані для дослідження впливу регульованих параметрів процесу подрібнення на його енергетичні та якісні показники.
3. Планування багатофакторного експерименту уможливило визначення впливу регульованих параметрів процесу подрібнення на його енергетичні та якісні показники.

## РОЗДІЛ 4

## РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ЇХ АНАЛІЗ

### 4.1. Вплив матеріалу поверхні ковзання та сортових особливостей зерен пшениці на коефіцієнт тертя ковзання

Встановлено, що коефіцієнт тертя ковзання є випадковою величиною, й отримано розподіли цієї випадкової величини для зерен пшениці сортів Смуглянка, Зимоярка і Золотолоса за різної відносної вологості  $\psi$  в разі взаємодії зерен зі сталевією та алюмінієвою поверхнями (рис. 4.1).

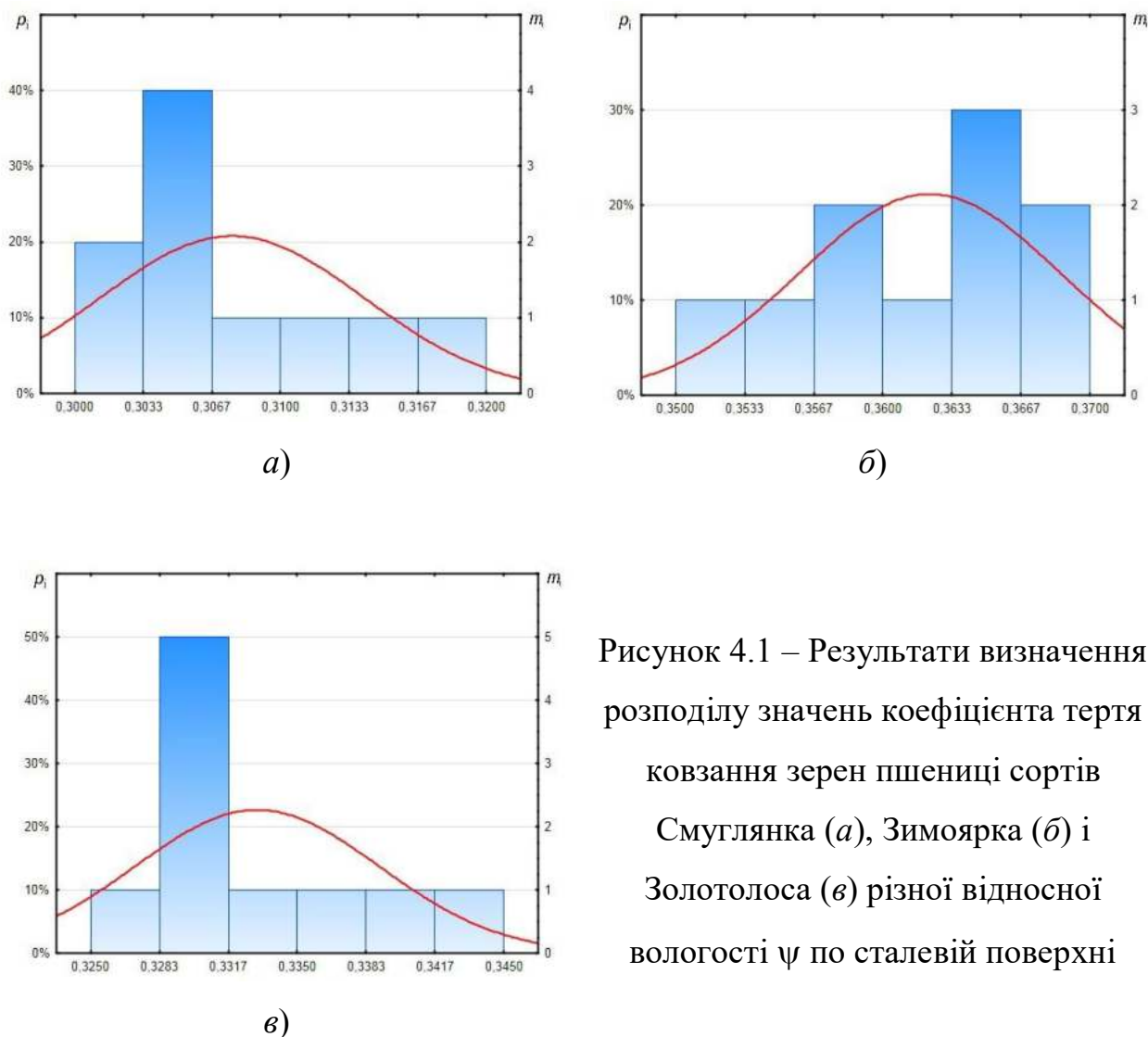


Рисунок 4.1 – Результати визначення розподілу значень коефіцієнта тертя ковзання зерен пшениці сортів Смуглянка (а), Зимоярка (б) і Золотолоса (в) різної відносної вологості  $\psi$  по сталевій поверхні

Визначено також параметри розподілу отриманих значень коефіцієнта тертя ковзання зерна пшениці по сталевій та алюмінієвій поверхнях, а саме: математичне сподівання  $M_f$ , середнє квадратичне відхилення  $\sigma_f$  та коефіцієнт варіації  $\nu_f$ .

Перевірка отриманих результатів за критерієм Вілкоксона показала, що різниця значень коефіцієнтів тертя ковзання для різних сортів зерна пшениці по сталевій поверхні є статистично значущою, по алюмінієвій поверхні – статистичної різниці для досліджуваних сортів пшениці не виявлено (рис. 4.2).

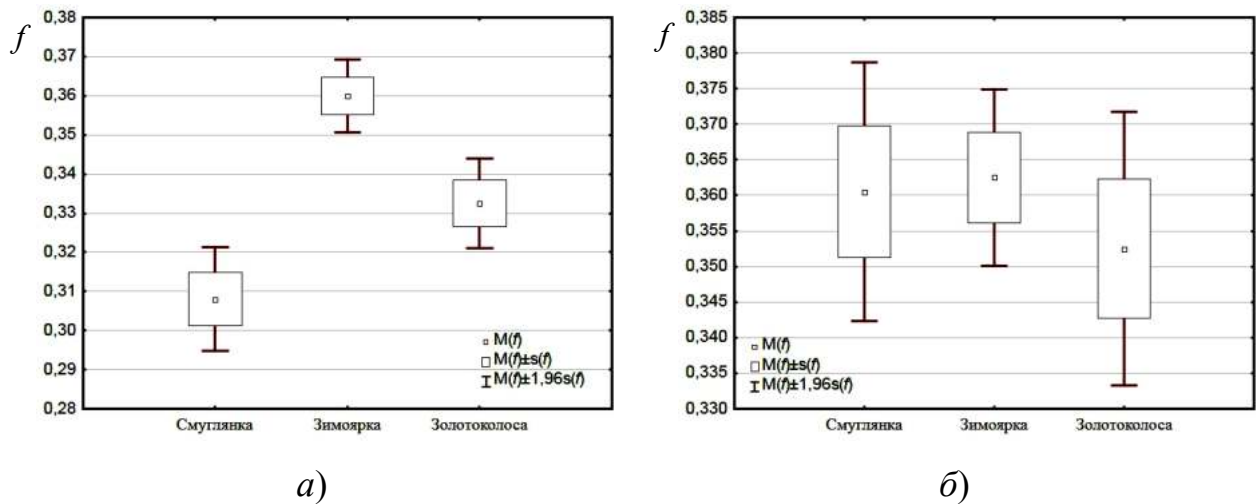


Рисунок 4.2 – Результати перевірки за критерієм Вілкоксона вибірок значень коефіцієнта тертя ковзання зерна пшениці сортів Смуглянка, Зимоярка і Золотоколоса по сталевій та алюмінієвій поверхнях:

*a* – статистично значуща різниця (сталь);

*б* – статистично незначуща різниця (алюміній)

Також під час перевірки за критерієм Вілкоксона зміна поверхні ковзання виявилась статистично значущою для двох сортів пшениці Смуглянка та Золотоколоса, тоді як для пшениці сорту Зимоярка ця різниця незначуща.

## 4.2. Вплив шорсткості сталевих поверхонь на коефіцієнт тертя ковзання

За результатами експерименту отримано розподіли коефіцієнта тертя ковзання для зерна пшениці сорту Смуглянка за відносної вологості  $\psi=14,4\%$  та для різних значень шорсткості  $Ra$  сталевих поверхонь. Для фрезерованих сталевих поверхонь їх шорсткість коливається від  $Ra = 10\text{--}12,5$  мкм для чорнового оброблення до  $Ra = 1,25$  мкм для чистового.

Також визначено параметри розподілу отриманих значень коефіцієнта тертя ковзання зерна пшениці по сталевих поверхнях різної шорсткості, а саме: математичне сподівання  $M_f$ , середнє квадратичне відхилення  $\sigma_f$  та коефіцієнт варіації  $\upsilon_f$ .

Перевірка отриманих результатів за критерієм Вілкоксона показала, що різниця значень коефіцієнтів тертя ковзання для пшениці сорту Смуглянка по сталевих поверхнях з однаковою шорсткістю є статистично значущою для шорсткості поверхні  $Ra = 12,5$  мкм орівняно з іншими досліджуваними поверхнями (рис. 4.3).

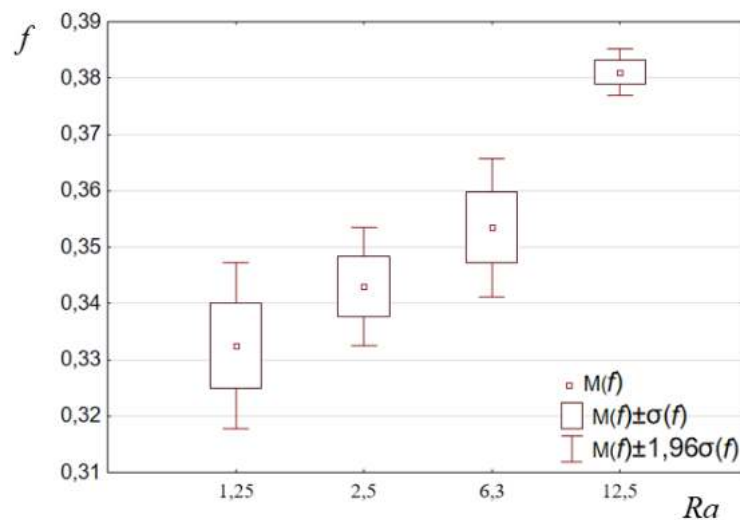


Рисунок 4.3 – Результати перевірки за критерієм Вілкоксона вибірок значень коефіцієнта тертя ковзання зерна пшениці сорту Смуглянка за відносної вологості  $\psi=14,37\%$  та для різних значень шорсткості  $Ra$  сталевих поверхонь

Методами регресійного аналізу [134] отримано залежність математичного сподівання  $M[f]$  коефіцієнта тертя ковзання зерна пшениці сорту Смуглянка за відносної вологості  $\psi=14,4\%$  від шорсткості сталевих поверхонь  $Ra$  у вигляді

$$M_f = 0,3271 - 0,0043 \cdot Ra, \quad (4.1)$$

де  $Ra$  – шорсткість поверхні, мкм.

З рис. 4.4 видно, що для зерен пшениці за відносної вологості  $\psi=14,4\%$  значення  $M_f$  зі зростанням шорсткості від  $Ra = 1,25$  мкм до  $Ra = 12,5$  мкм лінійно зростає від 0,33 до 0,38.

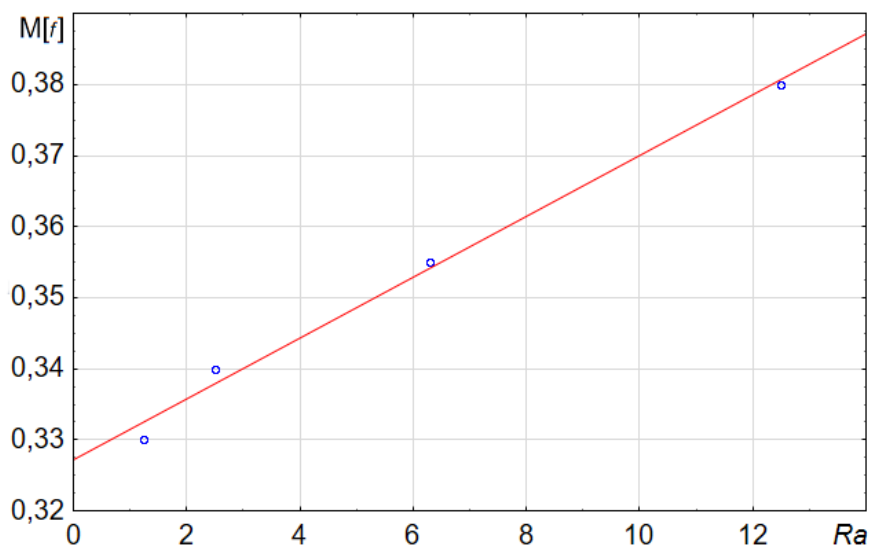
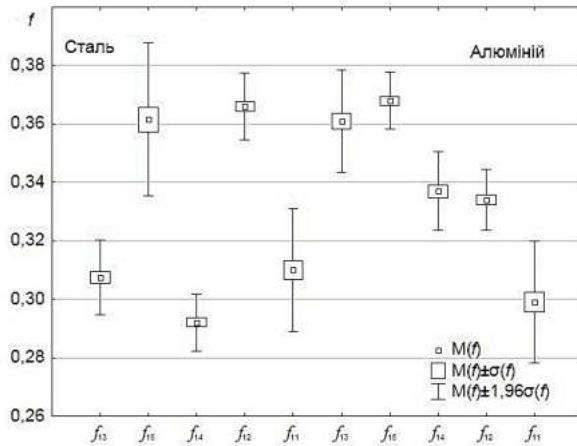


Рисунок 4.4 – Залежності математичного сподівання коефіцієнтів тертя ковзання  $M_f$  зерна пшениці за відносної вологості  $\psi = 14,37\%$  від шорсткості сталевих поверхонь

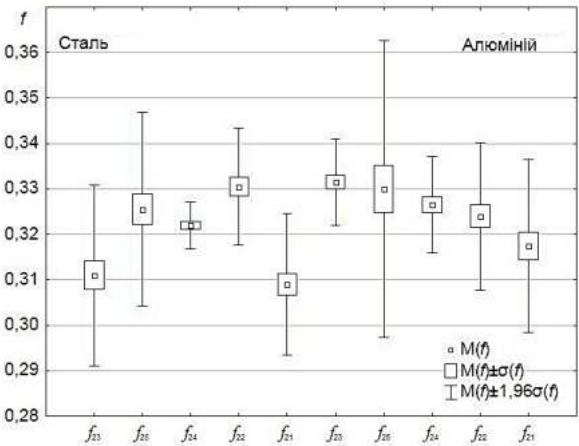
### 4.3. Вплив вологості та просторового розміщення зерен на коефіцієнт тертя ковзання

Досліджували зернини пшениці сорту Смуглянка для різних значень вологості 12,4; 13,1; 14,4; 18,1 і 23,3% та для трьох випадків розміщення зерен відносно напрямку переміщення: довільне розміщення, вертикальне, коли більша вісь зернини перпендикулярна до напрямку переміщення, та горизонтальне – більша вісь зернини паралельна до напрямку переміщення.

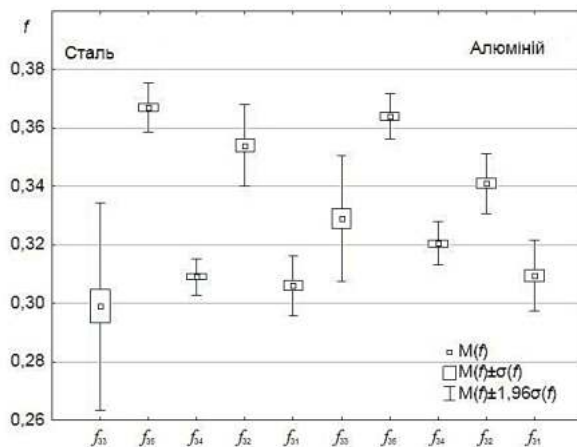
Перевірка отриманих результатів за критерієм Вілкоксона показала (рис. 4.5), що різниця значень коефіцієнтів тертя ковзання зерна пшениці сорту Смуглянка по сталевій та алюмінієвій поверхнях у разі розміщення зерен довільно та горизонтально є статистично значущою [135].



а)



б)



в)

Рисунок 4.5 – Результати перевірки за критерієм Вілкоксона вибірок значень коефіцієнта тертя зерна пшениці сорту Смуглянка різної відносної вологості по сталевій та алюмінієвій поверхнях за різного розміщення відносно напрямку переміщення:  
*а* – довільне, *б* – вертикальне,  
*в* – горизонтальне; за умов де  $f_{11}, f_{12}, f_{13}, \dots, f_{33}$  – різні значення відносної вологості зерен

Для інших випадків різниця значень коефіцієнтів тертя ковзання зерна пшениці та жита по сталевій та алюмінієвій поверхнях є статистично незначущою.

Методами регресійного аналізу [134] отримано характер залежності математичного сподівання коефіцієнта тертя ковзання  $M[f]$  зерен від їхньої відносної вологості  $\psi$  (рис. 4.6) у вигляді

$$M[f] = b_0 + b_1\psi + b_2\psi^2, \quad (4.2)$$

де  $b_0$ ,  $b_1$  і  $b_2$  – коефіцієнти регресії;

$f$  – коефіцієнт тертя ковзання;

$\psi$  – відносна вологість, %.

Перевірка отриманих регресійних залежностей за критерієм Фішера не дала підстав для їх відхилення.

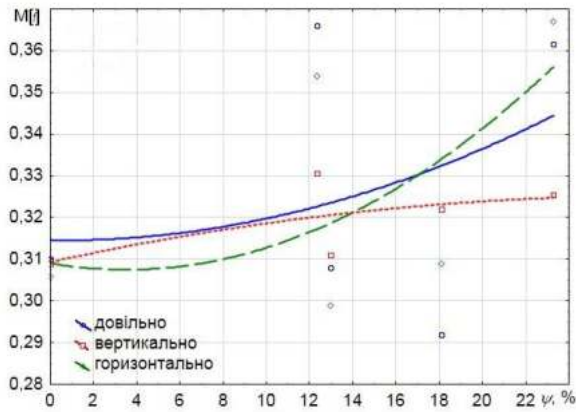
Значення коефіцієнтів регресії (4.2) подані в табл. 4.1.

Таблиця 4.1 – Значення коефіцієнтів регресії для коефіцієнтів тертя ковзання  $f$  зерна пшениці сорту Смуглянка

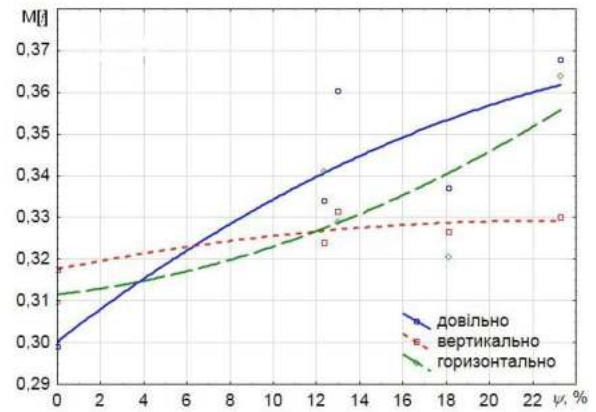
Матеріал	Розміщення зерен відносно напрямку переміщення	Коефіцієнт регресії		
		$b_0$	$b_1$	$b_2$
Сталь	Довільне	0,3145	$-4,843 \cdot 10^{-5}$	$5,7293 \cdot 10^{-5}$
	Вертикальне	0,3093	0,0011	$-1,9985 \cdot 10^{-5}$
	Горизонтальне	0,309	-0,0009	0,0001
Алюміній	Довільне	0,3003	$0,005 \cdot 10^{-5}$	$-5,7389 \cdot 10^{-5}$
	Вертикальне	0,3176	0,001	$-2,2486 \cdot 10^{-5}$
	Горизонтальне	0,3116	0,0006	$5,6418 \cdot 10^{-5}$

Для пшениці сорту Смуглянка в разі збільшення відносної вологості зерна коефіцієнт тертя ковзання як по сталі, так і по алюмінію поступово збільшується від 0,3 до 0,37. У разі розміщення зерен вертикально відносно напрямку переміщення ця зміна найменша, а найсуттєвіший вплив за довільного та горизонтального розміщень.





а)



б)

Рисунок 4.6 – Залежності математичного сподівання коефіцієнтів тертя ковзання  $f$  зерна пшениці сорту Смуглянка по сталі (а) та алюмінію (б) від їх відносної вологості  $\psi$  за різного розміщення зерен відносно напрямку переміщення

Значення коефіцієнта тертя ковзання для обох культур найменш чутливе до зміни відносної вологості за вертикального розміщення зерна порівняно з довільним та горизонтальним розміщенням.

#### 4.4. Вплив відносної вологості на геометричні параметри зерен пшениці

Характер розподілу довжини  $l_3$ , ширини  $b_3$  і товщини  $h_3$  зернин пшениці сорту Смуглянка відображений на рис. 4.7 [136]. Результати статистичного аналізу отриманих значень геометричних параметрів цих зернин відображені в табл. 4.2.

Методами регресійного аналізу [134] отримано характер залежності математичних сподівань довжини  $M[l_3]$ , ширини  $M[b_3]$ , товщини  $M[h_3]$  та коефіцієнта форми  $M[\xi_3]$  зернин вказаного сорту від їхньої відносної вологості  $\psi$  (рис. 4.8) у вигляді

$$M[x] = a_0 + a_1\psi + a_2\psi^2, \quad (4.3)$$

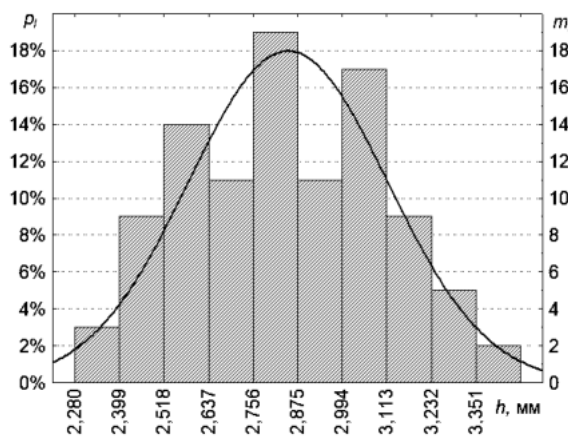
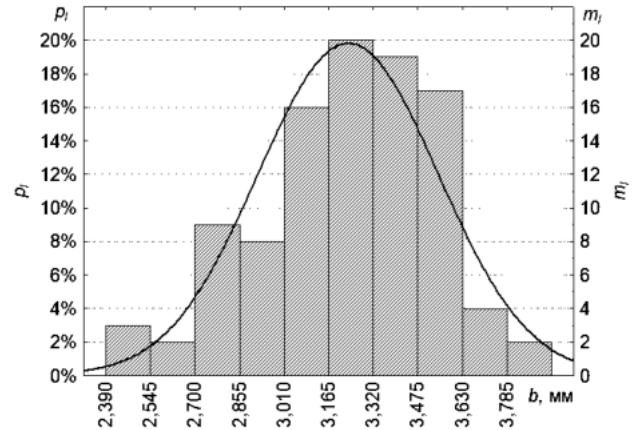
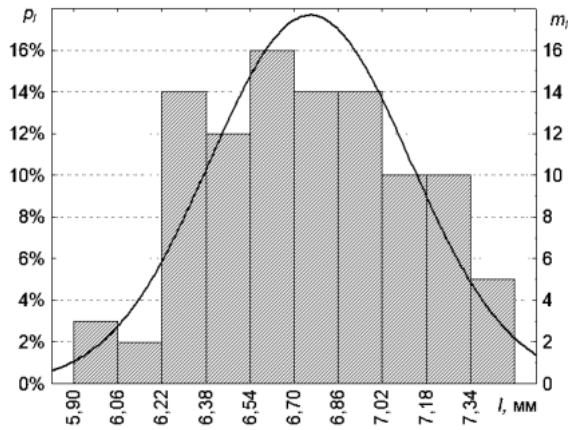


Рисунок 4.7 – Результати статистичного дослідження розподілу довжини  $l$ , ширини  $b$  та товщини  $h$  зернин пшениці сорту Смуглянка вологості  $\psi$  14,37%

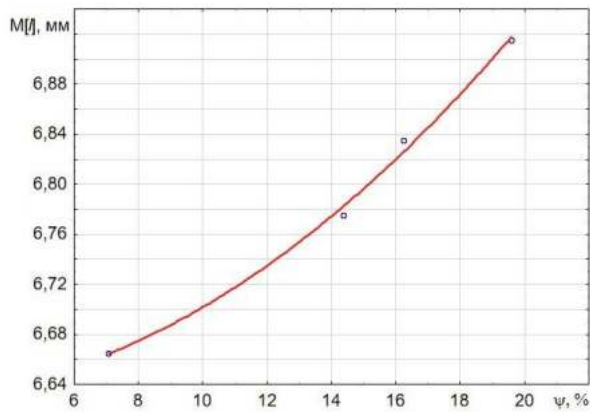
Таблиця 4.2 – Результати статистичного оброблення виміряних геометричних параметрів зерен пшениці сорту Смуглянка

Параметр зернини	Статистичні характеристики	Відносна вологість зерна, %			
		7,1	14,4	16,2	19,6
Довжина $l_3$	$M[l_3]$ , мм	6,665	6,775	6,835	6,915
	$\sigma[l_3]$ , мм	0,163743	0,13033	0,145867	0,131805
Ширина $b_3$	$M[b_3]$ , мм	3,3	3,255	3,245	3,395
	$\sigma[b_3]$ , мм	0,065437	0,097402	0,084666	0,099678
Товщина $h_3$	$M[h_3]$ , мм	2,815	2,845	2,84	2,915
	$\sigma[h_3]$ , мм	0,058770	0,069690	0,065401	0,080094
Коефіцієнт форми $\xi_3$	$M[\xi_3]$	1,096220	1,104640	1,111989	1,099042
	$\sigma[\xi_3]$	0,000463	0,000384	0,000352	0,000344

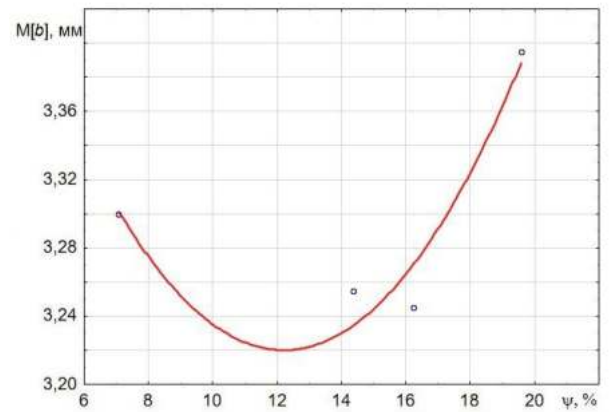
де  $a_0$ ,  $a_1$  і  $a_2$  – коефіцієнти регресії;

$x$  – коефіцієнт форми  $\xi_3$  або ж геометричний параметр (довжина  $l_3$ , ширина  $b_3$ , товщина  $h_3$ , мм);

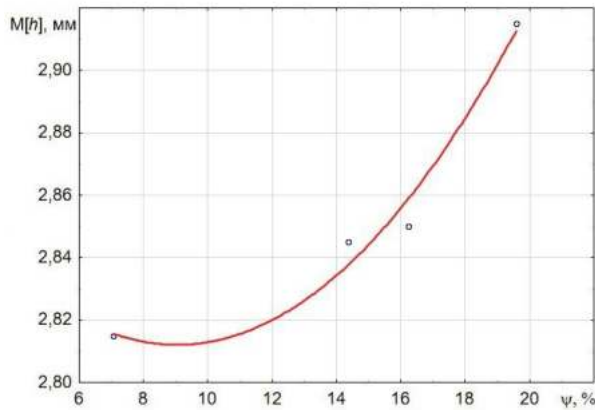
$\psi$  – відносна вологість, %.



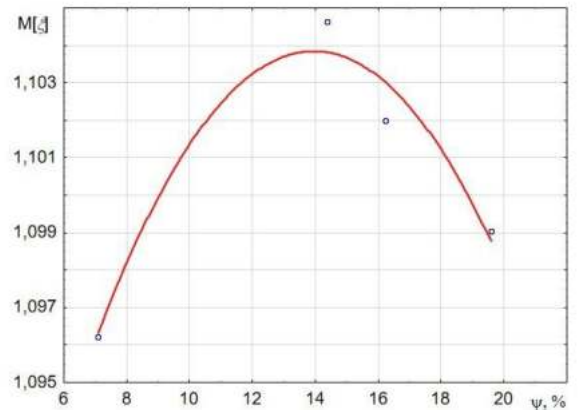
a)



б)



в)



г)

Рисунок 4.8 – Залежності математичного сподівання довжини  $l_3$  (a), ширини  $b_3$  (б) і товщини  $h_3$  (в) та коефіцієнта форми  $\xi_3$  (г) насінин пшениці сорту Смуглянка від їхньої відносної вологості  $\psi$

Перевірка отриманих регресійних залежностей за критерієм Фішера підтвердила їх достовірність.

Значення коефіцієнтів регресії (4.3) наведені в табл. 4.3.

Таблиця 4.3 – Значення коефіцієнтів регресії для геометричних параметрів насінин пшениці сорту Смуглянка

Геометричний параметр насінин	Коефіцієнт регресії		
	$a_0$	$a_1$	$a_2$
$M[l_3]$ , мм	6,63	-0,0006	0,0008
$M[b_3]$ , мм	3,68	-0,756	0,003
$M[h_3]$ , мм	2,886	-0,0164	0,0009
$M[\xi_3]$	1,0728	0,0045	0,0002

Мінімальні значення геометричних розмірів насінин пшениці сорту Смуглянка за відносної вологості  $\psi = 6-12\%$  (див. рис. 4.8) [139].

Отримані залежності довжини  $l_3$ , ширини  $b_3$  та товщини  $h_3$  насінин пшениці від їхньої відносної вологості  $\psi$  описуються поліномом другого порядку, що не узгоджується з відомими положеннями про лінійну залежність геометричних параметрів зернового матеріалу багатьох культур від його відносної вологості.

Таку різницю можна пояснити розглядом у попередніх роботах відносно невеликого діапазону зміни значень  $\psi$ . Зокрема, стосовно зерен пшениці брали до уваги переважно відносну вологість, більша за 10 %, не враховуючи менші значення.

Для зерен пшениці вологістю 14,4% диференціальні функції нормального розподілу довжини ( $l_3$ ), ширини ( $b_3$ ) та товщини ( $h_3$ ) для насіння пшениці сорту Смуглянка такі:

$$f(l_3) = \frac{1}{0.13\sqrt{2\pi}} e^{-\left[\frac{(l_3-6.775)^2}{2 \cdot 0.13^2}\right]}, \quad (4.4)$$

$$f(b_3) = \frac{1}{0.097\sqrt{2\pi}} e^{-\left[\frac{(b_3-3.255)^2}{2 \cdot 0.097^2}\right]}, \quad (4.5)$$

$$f(h_3) = \frac{1}{0.0697\sqrt{2\pi}} e^{-\left[\frac{(b_3-2.845)^2}{2 \cdot 0.0697^2}\right]} \quad (4.6)$$

У табл. 4.4 наведені значення коефіцієнтів кореляції між розмірами насіння пшениці, зокрема найбільше значення 0,745 – між шириною і товщиною зернини.

Таблиця 4.4 – Значення коефіцієнтів кореляції між окремими розмірами зернин досліджуваних культур

Культура, сорт	Коефіцієнт кореляції між:		
	довжиною та шириною	шириною та товщиною	довжиною і товщиною
Зерно пшениці сорту Смуглянка	0,266	0,745	0,475

Оскільки значення коефіцієнта кореляції між окремими розмірами зерен перевищують 0,4, існує ознака стійкої кореляції між цими розмірами, що повинно враховуватись у моделі двовимірного нормального розподілу розмірів насіння. Таким чином, двовимірна модель нормального розподілу ширини і товщини зерна пшениці сорту Смуглянка

$$f(b_3, h_3) = \frac{1}{2\pi \cdot 0,097 \cdot 0,07 \sqrt{1-0,475^2}} e^{-\frac{-1}{2(1-0,475^2)} \left[ \frac{(b_3-3,255)^2}{0,097^2} + \frac{(h_3-2,845)^2}{0,07^2} - 2 \cdot 0,475 \frac{b_3-3,255}{0,097} \cdot \frac{h_3-2,845}{0,07} \right]} \quad (4.7)$$

Модель двовимірного нормального розподілу ширини і товщини зерна пшениці сорту Смуглянка як залежних випадкових величин наведена на рис. 4.9.

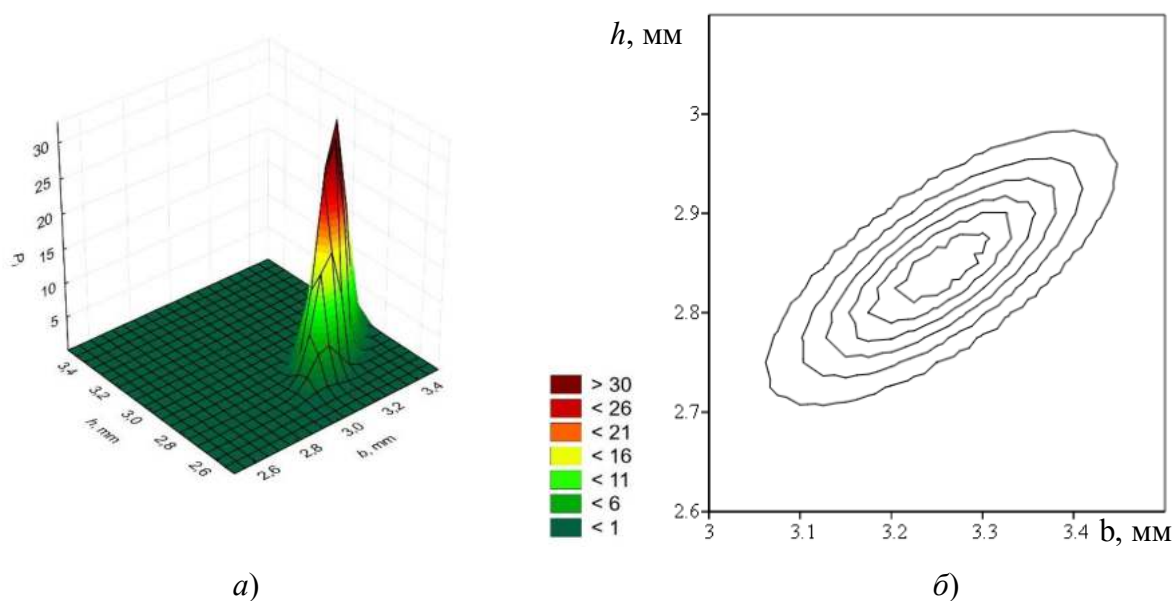


Рисунок 4.9 – Функція розподілу щільності ймовірностей геометричних розмірів насіння пшениці сорту Смуглянка як залежних випадкових величин –  $f(b, h)$ :  $a$  – поверхня відгуку,  $b$  – лінії рівнів.

#### 4.5. Механічні властивості зерен пшениці

За зростання відносної вологості зерен пшениці їх модуль Юнга і жорсткість зменшуються (рис. 4.10, 4.11). Залежність роботи руйнування зерен від їхньої вологості відображена на рис. 4.12. Як бачимо, зі збільшенням вологості зерен енергія їх руйнування зростає, що збігається з відомими результатами [143–148].

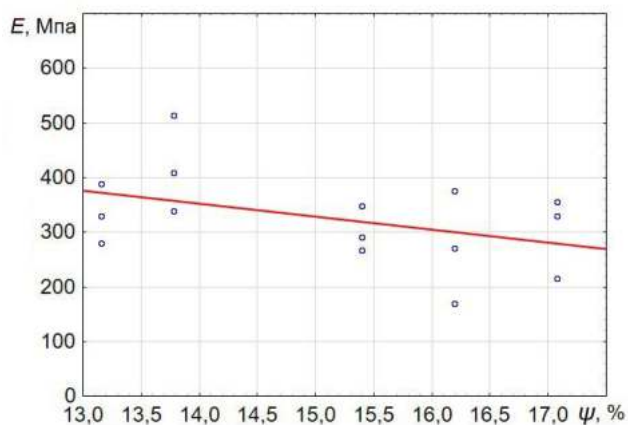


Рисунок 4.10 – Залежність модуля Юнга зерен від їхньої вологості

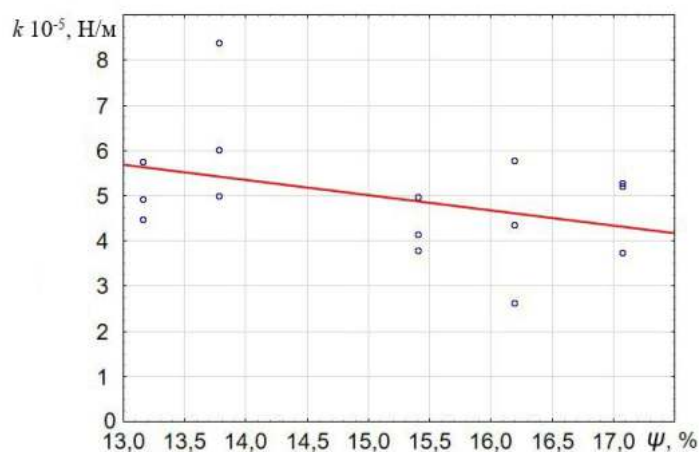


Рисунок 4.11 – Залежність жорсткості зерен від їхньої вологості

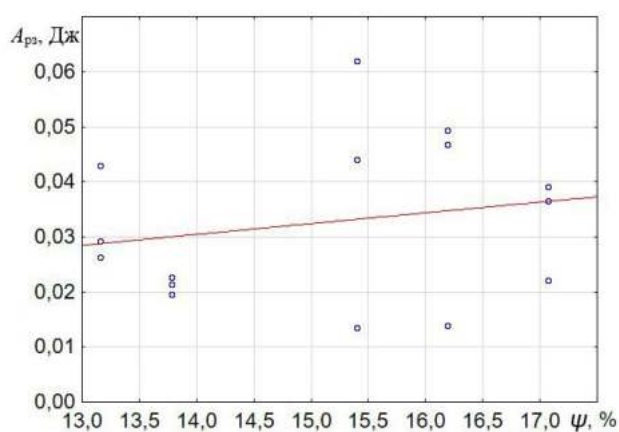


Рисунок 4.12 – Залежність роботи руйнування зерен від їхньої вологості

Зі збільшенням геометричних параметрів, зокрема довжини зерен, збільшуються сила і робота, необхідні для їх руйнування (рис. 4.13, 4.14).

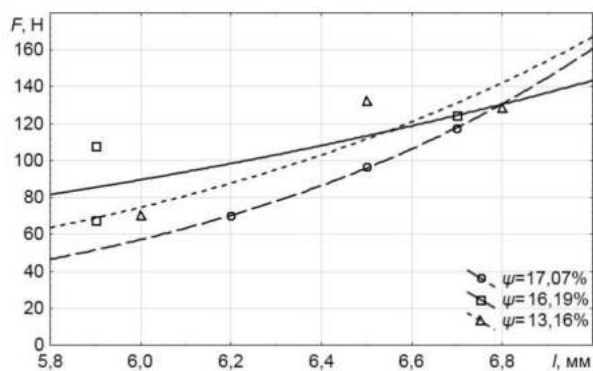


Рисунок 4.13 – Залежність навантаження руйнування зерен озимої пшениці сорту Смуглянка від їхньої довжини за різної вологості

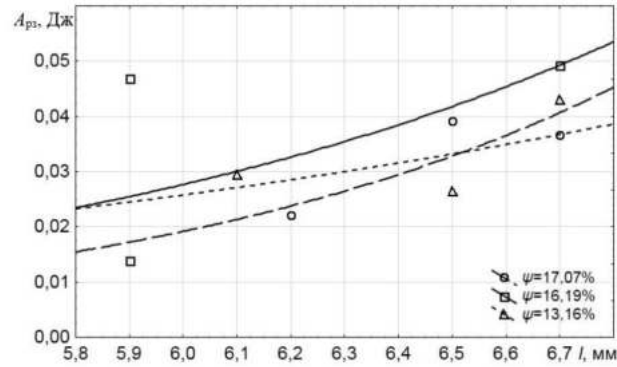


Рисунок 4.14 – Залежність роботи руйнування зерен озимої пшениці сорту Смуглянка від їхньої довжини за різної вологості

Методами регресійного аналізу [149] отримано характер залежностей навантаження  $F_{pz}$ , роботи руйнування зерен  $A_{pz}$  від їхньої довжини  $l$  (рис. 4.13, 4.14) у вигляді

$$y = ae^{(b \cdot l_3)}, \quad (4.8)$$

де  $a$ ,  $b$  – коефіцієнти регресії;

$l_3$  – довжина зерна, мм.

Значення коефіцієнтів регресії (4.4) відображені в табл. 4.5.

Таблиця 4.5 – Коефіцієнти рівнянь регресії пшениці сорту Смуглянка

Вологість, %	Параметр	$a$	$b$
$\psi=17,07$	$F_{pz}$ , Н	0,116	1,034
	$A_{pz}$ , Дж	$3,033 \cdot 10^{-5}$	1,075
$\psi=16,19$	$F_{pz}$ , Н	5,321	0,471
	$A_{pz}$ , Дж	0,0002	0,825
$\psi=13,16$	$F_{pz}$ , Н	0,598	0,805
	$A_{pz}$ , Дж	0,0012	0,506



На силу і роботу руйнування зерен пшениці суттєвий вплив мають їхні розміри та відносна вологість. Ці параметри є важливими для оптимального проєктування машин і устаткування для переробки зерна.

#### 4.6. Дослідження оптимальних параметрів багатofакторного експерименту

Дослідження впливу зазору  $k$  і кута  $\alpha$  між молотком та нерухомо встановленою пластиною на затрати потужності, необхідної для здійснення процесу подрібнення, забезпечення високої продуктивності й якісних показників процесу подрібнення проводили згідно з методикою, описаною у підрозділі 3.4. Метою цих досліджень було визначення оптимальних параметрів і режимів роботи дробарки для зниження питомої витрати енергії та покращання якості готової продукції. Експерименти здійснювались з використанням зерна озимої пшениці сорту Смуглянка відносною вологістю 14,1 %. Діаметр отворів решета становив – 5 мм.

Провівши багатofакторний експеримент згідно з розробленим планом, отримали результати, відображені в табл. 4.6.

Для підтвердження відтворюваності отриманих дослідних даних визначали їх дисперсію, відтворюваність дослідів перевіряли за критерієм Кохрена [150; 151].

Таблиця 4.6 – Результати багатofакторного експерименту

№ з/п	Значення кодованих факторів			Потужність $N$ , Вт			Продуктивність $Q$ , кг/год			Модуль подрібнення $M$ , мм		
	$x_1$	$x_2$	$x_3$	1	2	3	1	2	3	1	2	3
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
1	-1	-1	0	398,2	395,4	401,1	68,2	69,2	69,0	1,113	1,108	1,093
2	1	-1	0	493,8	490,9	494,1	73,2	73,4	73,9	0,945	0,958	0,929
3	-1	1	0	377,1	380,2	380,1	63,1	62,6	62,9	1,333	1,331	1,330

Кінець таблиці 4.9

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
4	1	1	0	424,9	425,6	429,3	68,4	69,4	68,9	1,235	1,24	1,258
5	-1	0	-1	386,3	387,9	382,6	67,8	69,1	68,0	1,248	1,246	1,232
6	1	0	-1	448,8	450,8	445,7	73,5	72,7	74,1	1,053	1,033	1,039
7	-1	0	1	380,1	379,4	377,7	66,5	67,5	66,3	1,245	1,228	1,239
8	1	0	1	446,1	443,1	442,2	72,2	71,6	71,6	1,068	1,089	1,073
9	0	-1	-1	425,2	429,1	426,7	69,6	70,6	70,6	1,033	1,032	1,016
10	0	1	-1	386,1	385,8	382,4	64,2	64,5	64,1	1,281	1,272	1,294
11	0	-1	1	412,9	415,1	411,8	68,3	69,3	67,9	1,035	1,055	1,024
12	0	1	1	378,2	380,3	377,0	63,8	64,3	63,0	1,288	1,289	1,294
13	0	0	0	388,9	389,2	389,7	68,1	66,9	67,2	1,106	1,109	1,086
14	0	0	0	388,9	389,2	389,7	68,0	68,2	66,9	1,11	1,117	1,120
15	0	0	0	388,9	389,2	389,7	68,2	67,5	67,6	1,107	1,127	1,085

Підставивши отримані дані з табл. 4.6 у формулу (3.20), отримали для:

– потужності

$$S_{k1}^2 = \frac{1}{3-1} ((398,2 - 398,25)^2 + (395,4 - 398,25)^2 + (401,1 - 398,25)^2) = 8,09;$$

– продуктивності

$$S_{k1}^2 = \frac{1}{3-1} ((68,2 - 68,8)^2 + (69,2 - 68,8)^2 + (69,0 - 68,8)^2) = 0,48;$$

– модуля подрібнення

$$S_{k1}^2 = \frac{1}{3-1} ((1,113 - 1,105)^2 + (1,108 - 1,105)^2 + (1,093 - 1,105)^2) = 2,11 \cdot 10^{-4}.$$

Аналогічні розрахунки проведено для решти дослідів, а результати відображені в табл. 4.7.

Розрахункове значення критерію Кохрена для:

– корисної потужності  $G_{pN} = \frac{8,09}{53,86} = 0,15;$

– продуктивності  $G_{pQ} = \frac{0,855}{7,188} = 0,119$ ;

– модуля подрібнення  $G_{pM} = \frac{0,0007}{0,0031} = 0,213$ .

Таблиця 4.7 – Результати розрахунку дисперсії відтворюваності

№ з/п	Потужність		Продуктивність		Модуль подрібнення	
	середнє значення, $N_{кор}$ , Вт	дисперсія значення, $S_{ki}^2$	середнє значення, Q, кг/год	дисперсія значення, $S_{ki}^2$	середнє значення, M, мм	дисперсія значення, $S_{ci}^2$
1	2	3	4	5	6	7
1	398,3	12,214	68,8	0,480	1,105	$2,11 \cdot 10^{-4}$
2	492,9	4,077	73,5	0,255	0,944	$3,24 \cdot 10^{-4}$
3	379,1	5,505	62,9	0,091	1,331	$4,61 \cdot 10^{-6}$
4	426,6	10,933	68,9	0,375	1,244	$2,83 \cdot 10^{-4}$
5	385,6	12,025	68,3	0,660	1,242	$1,44 \cdot 10^{-4}$
6	448,4	10,424	73,4	0,718	1,042	$1,73 \cdot 10^{-4}$
7	379,1	2,892	66,8	0,558	1,237	$1,05 \cdot 10^{-4}$
8	443,8	8,268	71,8	0,220	1,077	$1,65 \cdot 10^{-4}$
9	427,0	5,525	70,3	0,611	1,027	$1,69 \cdot 10^{-4}$
10	384,8	8,045	64,3	0,059	1,282	$1,91 \cdot 10^{-4}$
11	413,2	3,982	68,5	0,720	1,038	$3,49 \cdot 10^{-4}$
12	378,5	3,935	63,7	0,680	1,290	$1,98 \cdot 10^{-5}$
13	389,3	0,362	67,4	0,655	1,100	$2,75 \cdot 10^{-4}$
14	389,3	0,362	67,7	0,855	1,116	$5,18 \cdot 10^{-5}$
15	389,3	0,362	67,8	0,251	1,106	$6,69 \cdot 10^{-4}$

Табличне значення критерію Кохрена, якщо  $n = 15$  та  $f = 3 - 1 = 2$  становить 0,3346. У нашому випадку  $G_T = 0,3346 > (G_{pN} = 0,137, G_{pQ} = 0,119$  і  $G_{pM} = 0,213)$ . У результаті цього можна зробити висновок, що досліді є відтворюваними.

За експериментальними даними за допомогою програмного забезпечення *Statistica 10* були отримані кодовані коефіцієнти рівнянь регресії (дод. 3).

Після підстановки отриманих коефіцієнтів у формулу (3.16) були отримані повні квадратні рівняння:

– для корисної потужності  $N_{\text{кор}}$

$$y_N = 389,297 + 33,713x_1 - 20,3x_2 - 3,896x_3 - 11,794x_1x_2 + 0,469x_1x_3 + 1,879x_2x_3 + \\ + 24,124x_1^2 + 10,8x_2^2 + 0,791x_3^2; \quad (4.9)$$

– для продуктивності  $Q$

$$y_Q = 68,1 + 2,7125x_1 - 2,475x_2 - 1,7x_3 + 0,075x_1x_2 + 0x_1x_3 + 0,225x_2x_3 + \\ + 1,825x_1^2 - 1,7x_2^2 + 0,075x_3^2; \quad (4.10)$$

– для модуля подрібнення  $M$

$$y_M = 1,1077 - 0,08x_1 + 0,1264x_2 + 0,0026x_3 + 0,0175x_1x_2 + 0,0045x_1x_3 + 0,00125x_2x_3 - \\ - 0,0215x_1^2 + 0,0273x_2^2 + 0,0243x_3^2. \quad (4.11)$$

Перевірку адекватності рівнянь регресії проводили за критерієм Фішера. Рівняння адекватні, якщо критерій Фішера за рівня значущості 5 % менший від його табличного значення  $F = \frac{S_{ad}^2}{S_y^2} < F(0,05; f_{ad}; f_y)$ . У нашому випадку

$$f_{ad} = 15 - 3 - 1 = 11; \quad f_y = 15 \cdot (3 - 1) = 30.$$

Для отриманих значень  $f_{ad} = 11$ ,  $f_y = 30$  табличне значення критерію Фішера становить 2,12 [150].

Дисперсія адекватності становить для:

– потужності  $S_{ad}^2 = \frac{1}{11} \cdot 45,54 = 4,14$ ;

– продуктивності  $S_{ad}^2 = \frac{1}{11} \cdot 2,279 = 0,207$ ;

– модуля подрібнення  $S_{ad}^2 = \frac{1}{11} \cdot 0,002 = 0,0002$ .

Відповідно до даних табл. 4.7 дисперсія відтворюваності дорівнює для:

– потужності  $S_y^2 = \frac{53,86}{15} = 3,59$ ;

– продуктивності  $S_y^2 = \frac{4,59}{15} = 0,306$ ;

– модуля подрібнення  $S_y^2 = \frac{0,002}{15} = 0,00013$ .

Тоді критерій Фішера для:

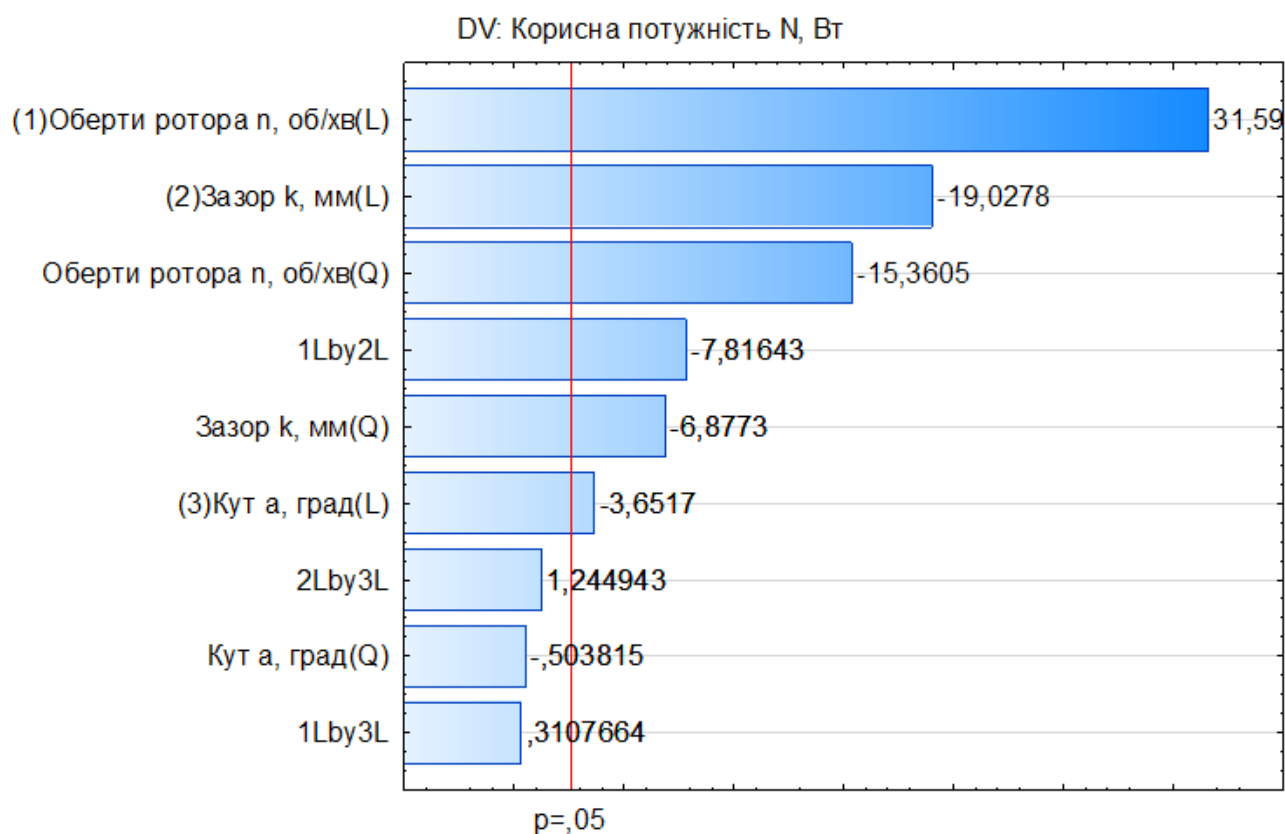
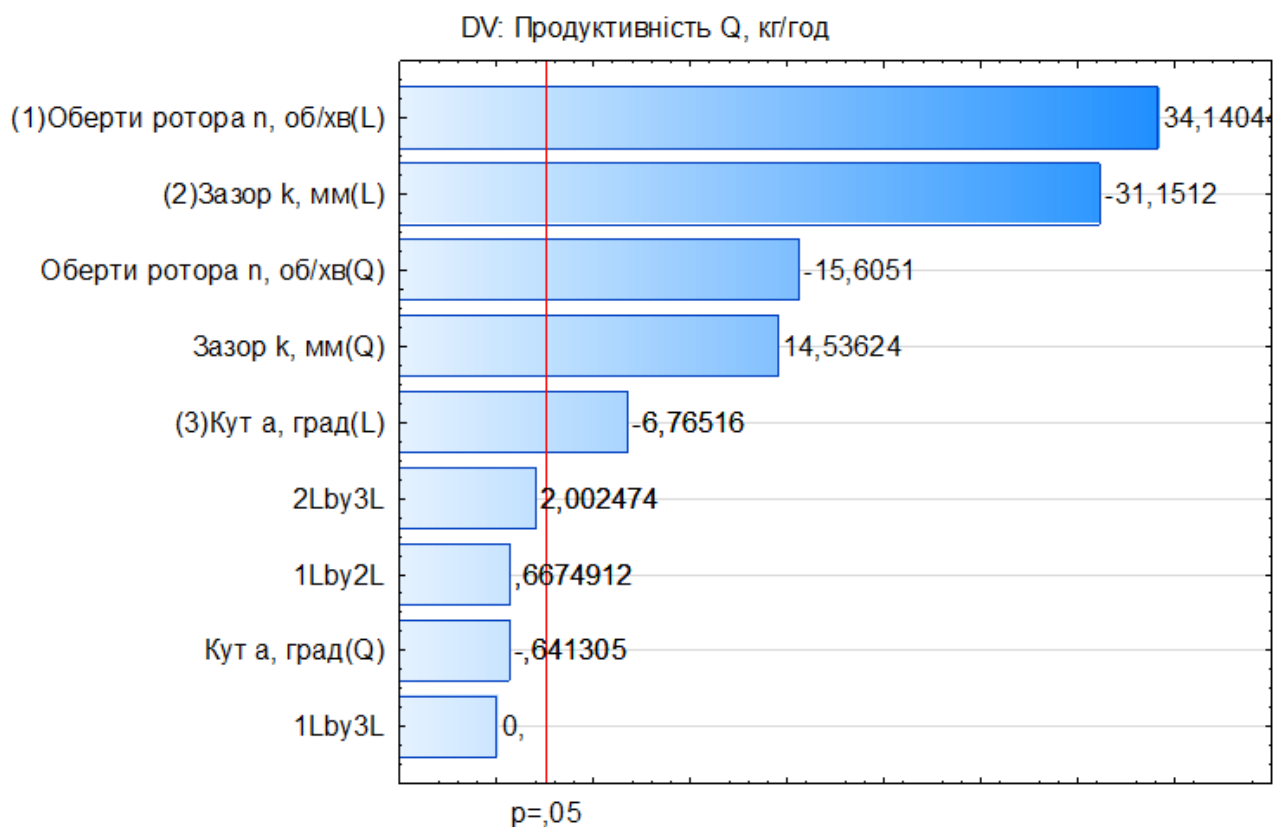
– потужності  $F_{p.} = \frac{4,14}{3,59} = 1,15$ ;

– продуктивності  $F_{p.} = \frac{0,207}{0,306} = 0,677$ ;

– модуля подрібнення:  $F_{p.} = \frac{0,0002}{0,00013} = 1,6$ .

Всі три значення розрахункового критерію Фішера менші від табличного. На підставі цього можемо стверджувати, що модель адекватна.

Результати регресійного аналізу відображені в дод. 3. Статистична значущість і ступінь впливу кожного з факторів на залежні змінні можуть бути представлені картами Парето. Стандартизовані ефекти характеризують відмінність варіації залежної змінної, зумовленої внеском певного фактору, від стандартної помилки залежної змінної. Карта побудована у вигляді горизонтальної гістограми, кожен стовпчик якої відповідає одному з факторів у лінійній чи квадратичній формі або міжфакторній взаємодії. Чим більша довжина стовпчика, тим більше вплив цього фактору на залежну змінну відрізняється від впливу випадкової помилки експерименту.

Рисунок 4.15 – Карта Парето для корисної потужності  $N_{кор}$ Рисунок 4.16 – Карта Парето для продуктивності  $Q$

Додатне значення коефіцієнта вказує на пряму, а від’ємне – на обернену залежність. На рис. 4.15 відображено карту Парето для корисної потужності  $N_{\text{кор}}$ , звідки можна зробити висновок, що на корисну потужність суттєвий вплив мають лінійні та квадратичні складові частоти обертання ротора дробарки  $n$ , величина зазору  $k$  та їх взаємодії; також незначно впливає лінійна складова кута  $\alpha$ . Інші коефіцієнти,  $b_{33}$ ,  $b_{23}$  і  $b_{13}$ , вплив яких на корисну потужність менше 5 %, незначущі і їх можна вилучити з рівняння регресії.

Карта Парето (рис. 4.16) показує, що на продуктивність  $Q$  суттєвий вплив мають лише лінійні і квадратичні складові частоти обертання ротора дробарки  $n$  та величина зазору  $k$ , а також лінійна складова кута  $\alpha$ . Коефіцієнти  $b_{23}$ ,  $b_{12}$ ,  $b_{33}$  і  $b_{13}$  незначущі.

На модуль подрібнення  $M$  максимальний статистично значущий вплив має лінійна складова зазору  $k$  і частоти обертання ротора  $n$ , незначно впливають квадратичні складові зазору  $k$  та кута  $a$  (рис. 4.17). Рівень впливу інших коефіцієнтів менший 5%, тому  $b_{23}$ ,  $b_{12}$ ,  $b_{33}$  і  $b_{13}$  незначущі.

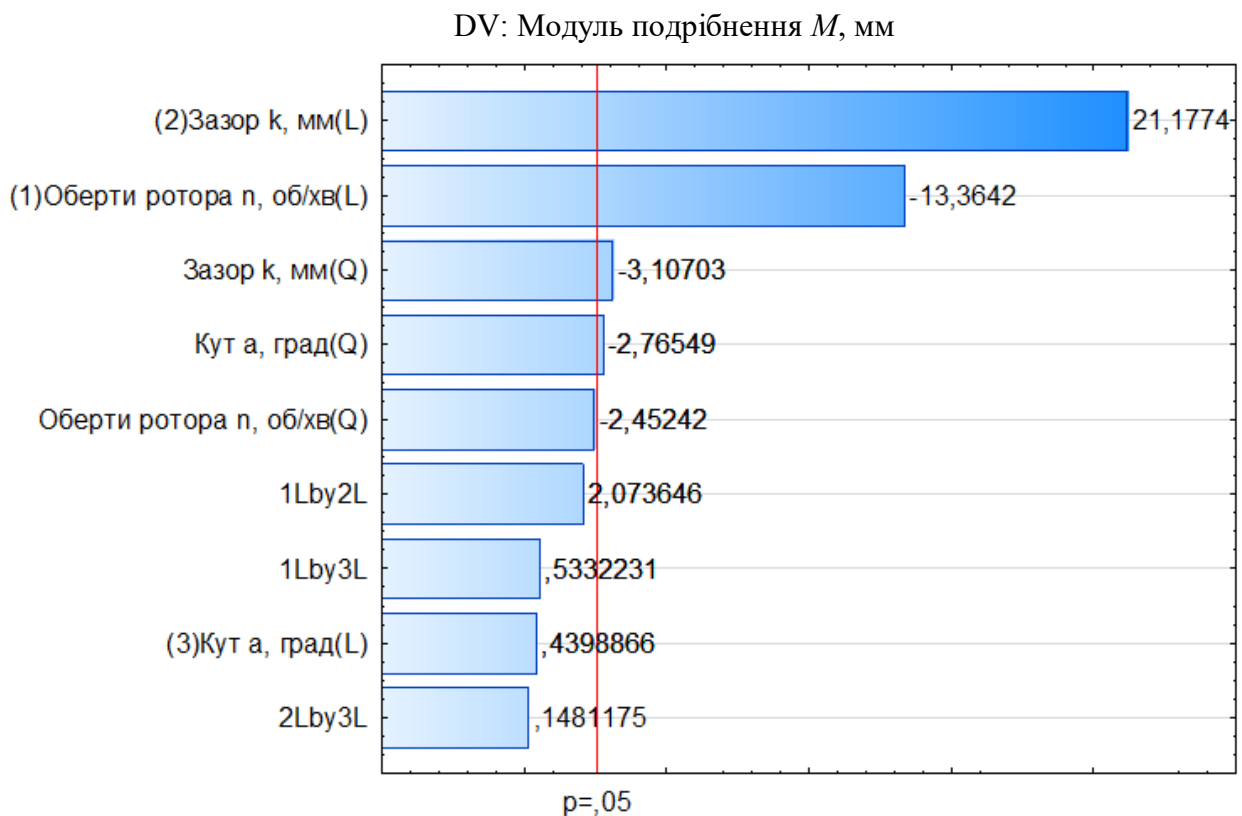


Рисунок 4.17 – Карта Парето для модуля подрібнення  $M$

Тепер можна перейти від кодованих до натуральних значень факторів  $X_1$ ,  $X_2$  і  $X_3$  в рівняннях (3.16) та (3.17) для:

– потужності

$$N=1022,27-0,466x_1+3,458x_2-4,145x_3-0,0236x_1x_2+0,00028x_1x_3+0,57x_2x_3+ \\ +0,0001x_1^2+10,8x_2^2+0,073x_3^2; \quad (4.12)$$

– продуктивності

$$Q=118,889-0,0387x_1+3,418x_2-0,391x_3+0,000035x_1x_2+0,00015x_1x_3+ \\ 0x_2x_3+0,0000073x_1^2-1,7x_2^2+0,006887x_3^2; \quad (4.13)$$

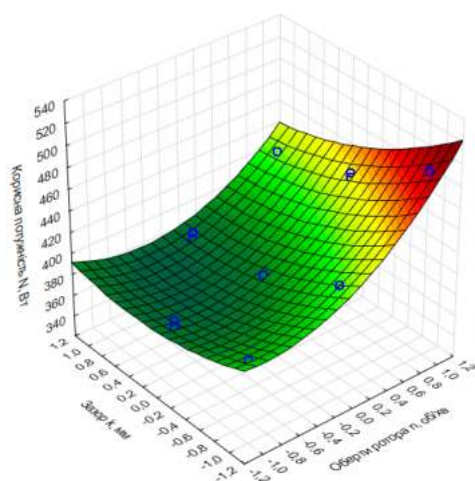
– модуля подрібнення

$$M=2,583-0,0008x_1-0,09x_2-0,038x_3+0,000035x_1x_2+0,0000035x_1x_3+ \\ 0,00038x_2x_3+0x_1^2-0,027x_2^2+0,0022x_3^2. \quad (4.14)$$

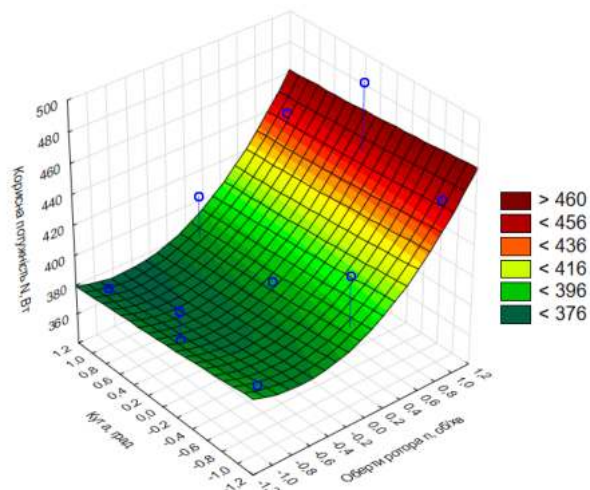
На основі отриманих рівнянь (4.12) – (4.14) побудовано поверхні відгуку корисної потужності, затраченої на подрібнення, продуктивності і модуля подрібнення від частоти обертання ротора, зазору та кута між молотком і нерухомо встановленою пластиною. Для побудови поверхонь відгуку варіювались попарно по два фактори, а третій залишався на нульовому рівні. Для розрахунків використано програмне забезпечення *Statistica 10*.

З рис 4.18 видно, що поверхня відгуку має мінімум за таких кодованих значень вхідних параметрів подрібнення:  $x_1 = -0,6$ ;  $x_2 = 0,6$ ;  $x_3 = 1,0$ . Найбільший вплив на корисну потужність, затрачену на подрібнення, мають параметри  $x_1$  – частота обертання ротора і  $x_2$  – зазор між молотком і пластиною.

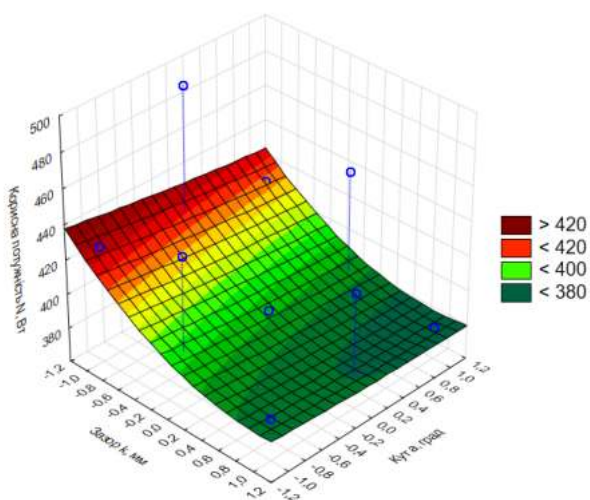




а)



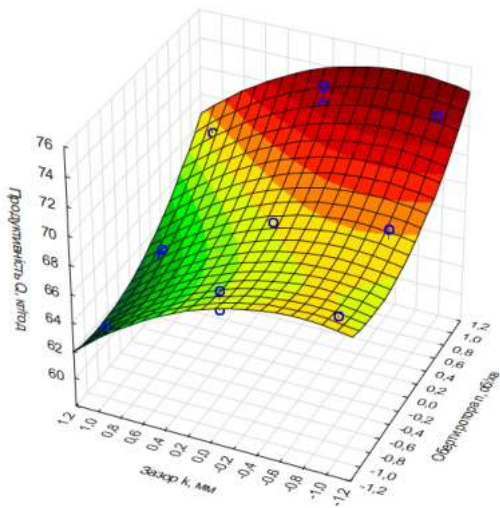
б)



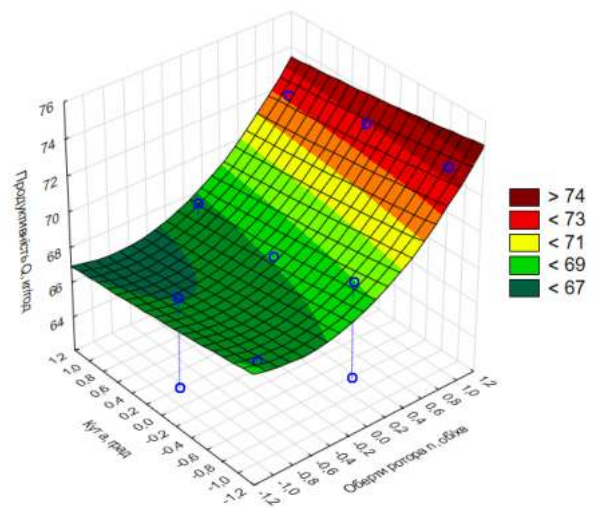
в)

Рисунок 4.18 – Залежності корисної потужності  $N$  від досліджуваних факторів: а – зазору  $k$  і частоти обертання ротора  $n$ ; б – кута  $\alpha$  і частоти обертання ротора  $n$ ; в – зазору  $k$  і кута  $\alpha$

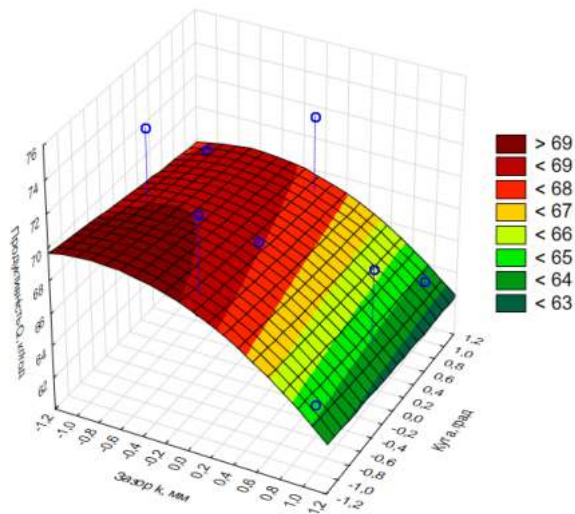
На рис. 4.19 показані поверхні відгуку продуктивності дробарки, яка досягає максимуму за таких кодованих значень вхідних параметрів подрібнення:  $x_1 = -1,0$ ;  $x_2 = -0,7$ ;  $x_3 = -1,0$ . Порівнявши з рис. 4.16, де ми шукали мінімальні енергозатрати, для максимального зазору  $k$  показник продуктивності найнижчий.



а)



б)



в)

Рисунок 4.19 – Залежності продуктивності  $Q$  від досліджуваних факторів: а – зазору  $k$  і частоти обертання ротора  $n$ ; б – кута  $\alpha$  і частоти обертання ротора  $n$ ; в – зазору  $k$  і кута  $\alpha$

Максимум поверхні відгуку модуля подрібнення (рис. 4.20) отримано за таких кодованих значень вхідних параметрів подрібнення:  $x_1 = -1,0$ ;  $x_2 = 1,0$ ;  $x_3 = 1,0$ .

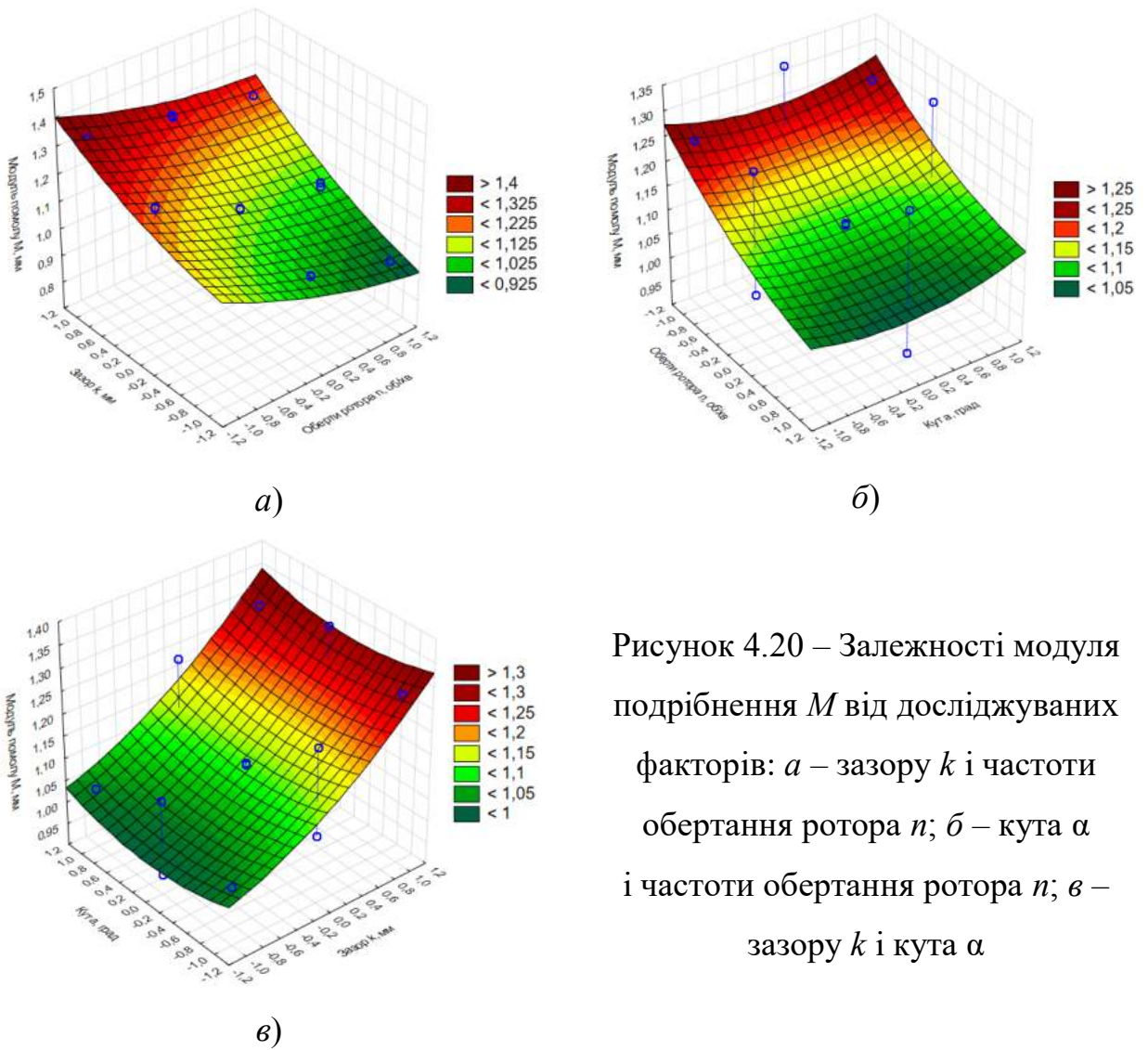


Рисунок 4.20 – Залежності модуля подрібнення  $M$  від досліджуваних факторів:  $a$  – зазору  $k$  і частоти обертання ротора  $n$ ;  $б$  – кута  $\alpha$  і частоти обертання ротора  $n$ ;  $в$  – зазору  $k$  і кута  $\alpha$

З рис. 4.19, 4.20 видно, що зі зростанням продуктивності також зростає й потужність, затрачена на процес подрібнення.

Зі збільшенням частоти обертання ротора і зменшенням зазору  $k$  зменшується модуль подрібнення, а також зростає вміст надмірно подрібнених частинок.

На рис. 4.21 відображено профілі прогнозованих бажаних значень досліджуваних параметрів. Зокрема, у випадку заданих бажаних параметрів, а саме максимальної продуктивності і мінімальної затрати потужності та модуля подрібнення 1 мм із рівнем задоволеності 0,667, можна стверджувати, що необхідна частота обертання ротора – 3000 об./хв, зазор між молотком і пластиною – 2 мм, а кут між ними –  $6,7^\circ$ .

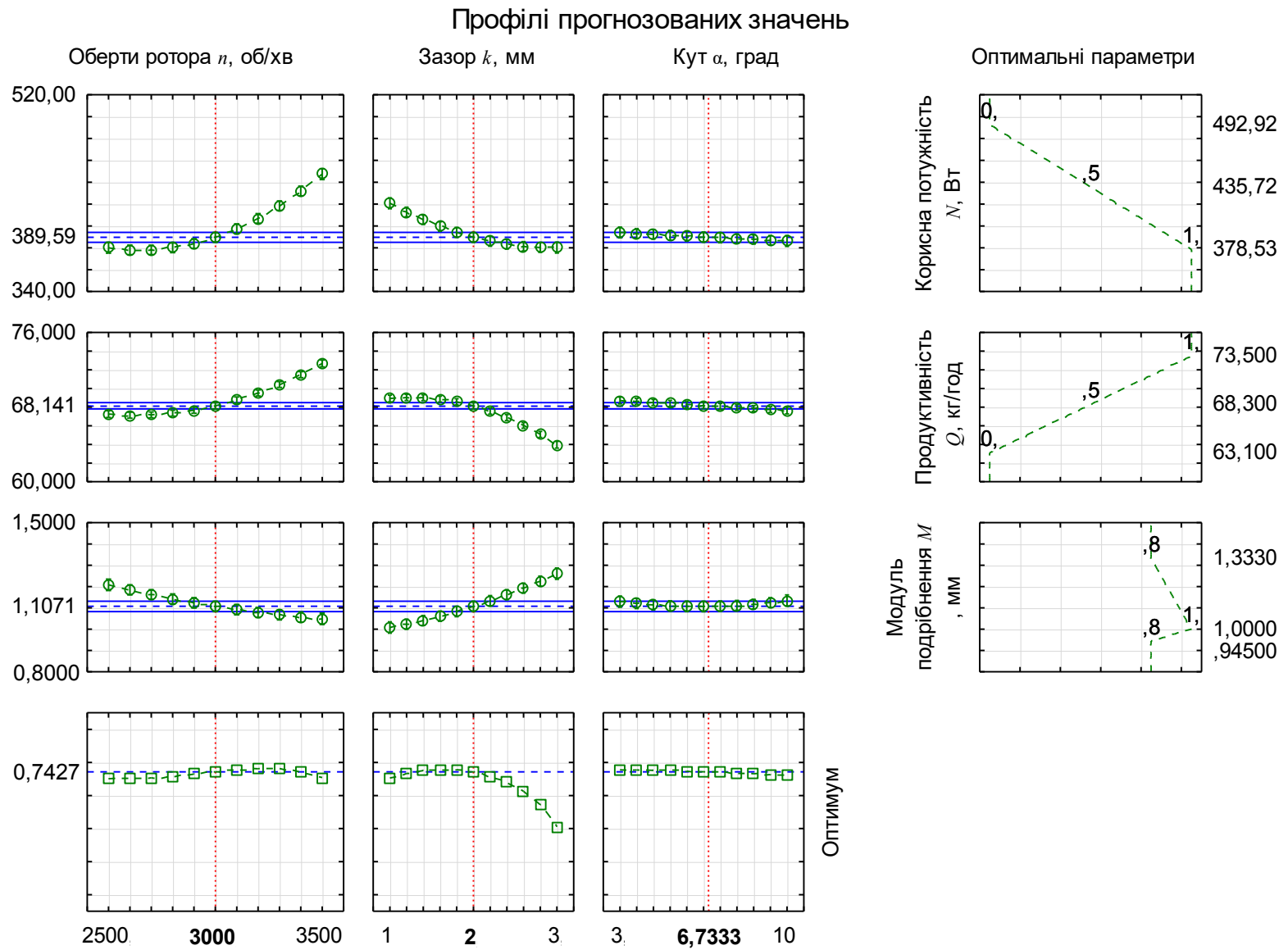


Рисунок 4.21 – Визначення оптимальних параметрів

#### 4.7. Результати дослідження гранулометричного складу подрібненого зерна

Провівши дослідження гранулометричного складу подрібненої пшениці на різних режимах роботи лабораторної установки відповідно до плану багатofакторного експерименту, отримали результати, які відображені у табл. 4.8.

Таблиця 4.8 – Результати розрахунку дисперсії відтворюваності

№ з/п	Вміст частинок менших від 0,212 мм, %	Вміст частинок більших від 3 мм, %	Модуль подрібнення М, мм	Дисперсія $\sigma$ , мм	Варіація $\nu$ , %
1	2	3	4	5	6
1	8,3	1,1	1,113	0,695	62,44
2	7,6	1,2	0,945	0,732	75,34
3	4,2	1,3	1,333	0,721	54,09
4	4,5	0,4	1,235	0,632	51,17
5	4,5	0,3	1,248	0,622	49,84
6	5,3	0,5	1,053	0,628	59,64
7	4,5	0,1	1,245	0,661	53,09
8	5,2	0,1	1,068	0,572	53,56
9	8,5	0,7	1,033	0,668	64,67
10	4,4	0	1,281	0,581	45,36
11	5,4	0,6	1,035	0,691	66,76
12	4,3	1,2	1,288	0,654	50,78
13	4,9	0,3	1,106	0,63	56,96
14	4,9	0,3	1,106	0,63	56,96
15	4,9	0,3	1,106	0,63	56,96

Із результатів дослідження гранулометричного складу можна зробити висновок, що для оптимальних параметрів, визначених (див. рис. 4.21), модуль подрібнення становить 1,1 мм, середньоквадратичне відхилення розмірів подрібненого зерна пшениці – 0,63 мм, а варіація – 56,96 % (рис. 4.22).

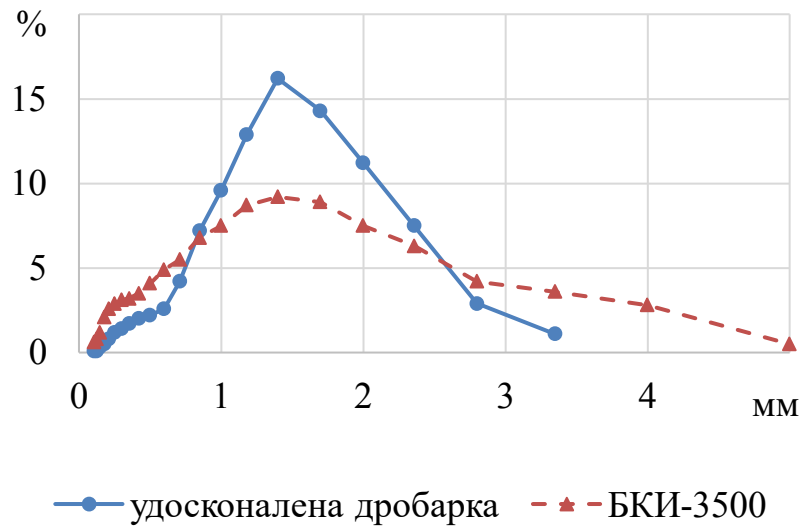


Рисунок 4.22 – Порівняння гранулометричного складу подрібненого продукту між удосконаленою дробаркою і БКІ-3500

Для більшості проведених експериментів частка надмірно подрібненого зерна (розміром менше ніж 0,212 мм) становить до 5 %, але у випадку зазору між молотком та нерухомо встановленою пластиною, рівного 1 мм, ця частка зростає до 7–8 %. Вміст частинок, розміром понад 3 мм не перевищує допустимих значень (5–12 %) для сільськогосподарських тварин різного виду, групи та віку [36–42] і коливається від 0 до 1,3 %.

#### 4.8. Дослідження впливу комбінованого методу подрібнення на його питому енергоємність

Для дослідження впливу на подрібнення комбінованого методу цього процесу, із встановленими нерухомими пластинами та молотками зі змінною



товщиною робочої зони, проведено додатковий експеримент за трьох значень частоти обертання ротора дробарки. Порівняно затрати потужності на подрібнення і продуктивність для трьох випадків (рис. 4.23): 1 – класична дробарка без встановлених нерухомих пластин із молотками з кутом  $\alpha = 0^\circ$ ; 2 – встановлені пластини, що забезпечують зазор між молотком і пластиною  $k = 2$  мм, причому молотки з кутом  $\alpha = 0^\circ$ ; 3 – встановлені пластини (зазор  $k = 2$  мм із молотками з кутом  $\alpha = 6,7^\circ$ ). Із зростанням частоти обертання зростає як потужність, затрачена на подрібнення, так і продуктивність.

Також було досліджено вплив комбінованого методу подрібнення зі встановленими пластинами і молотками зі скошеними гранями на питому енергоємність (рис. 4.24).

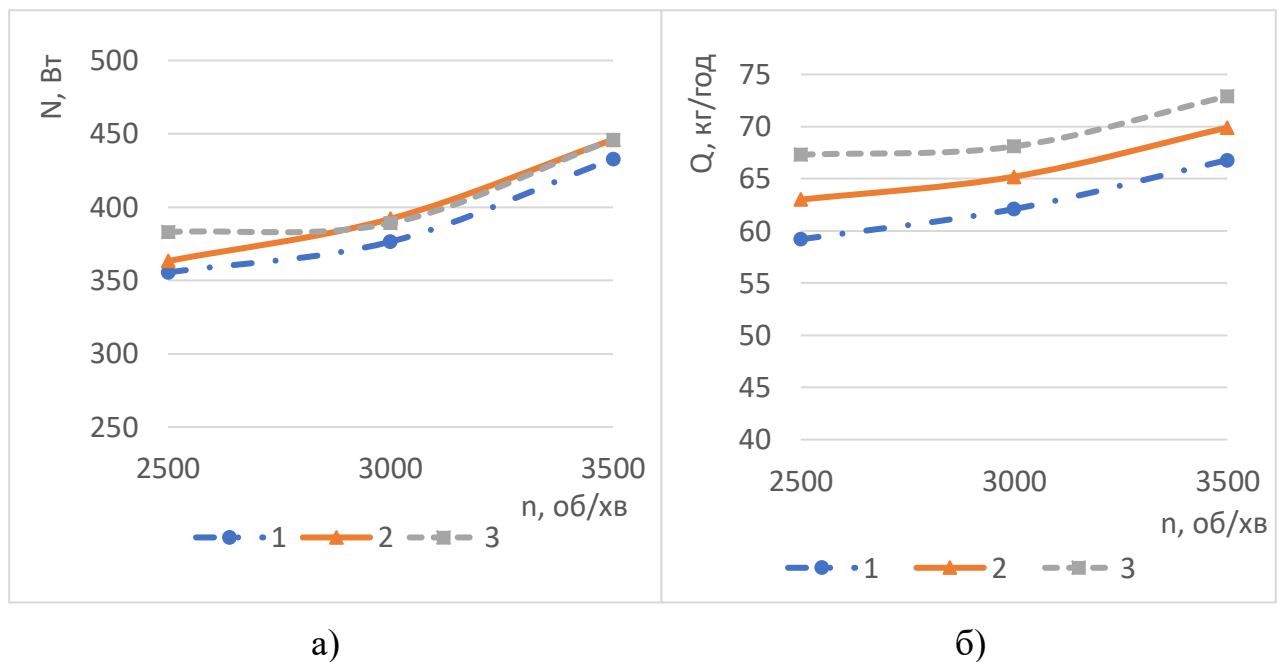


Рисунок 4.23 – Залежності потужності (а) та продуктивності (б) від частоти обертання ротора: 1 – без пластин, кут  $\alpha = 0^\circ$ ; 2 – встановлені пластини, зазор  $k = 2$  мм, кут  $\alpha = 0^\circ$ ; 3 – встановлені пластини,  $k = 2$  мм,  $\alpha = 7^\circ$

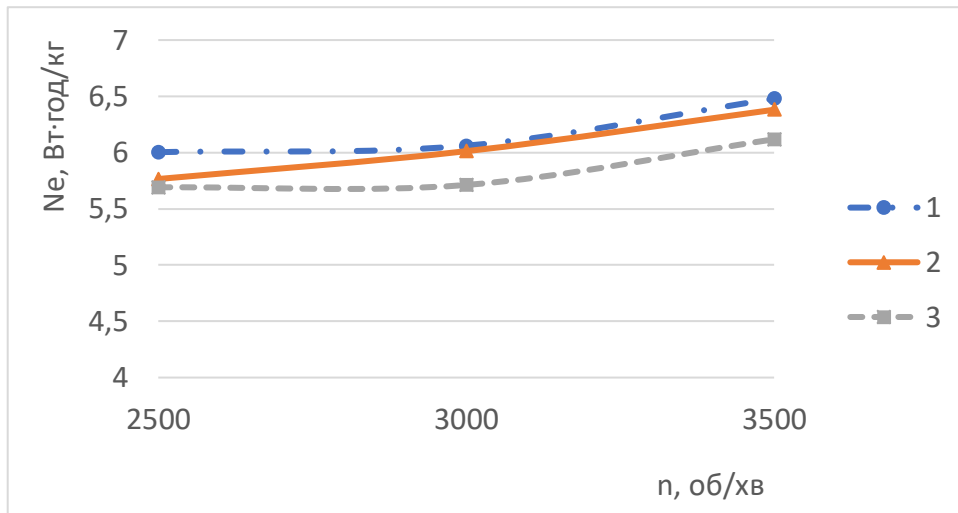


Рисунок 4.24 – Залежність питомої енергоємності від частоти обертання ротора: 1 – без пластин, кут  $\alpha = 0^\circ$ ;  
 2 – встановлені пластини, зазор  $k = 2$  мм, кут  $\alpha = 0^\circ$ ;  
 3 – встановлені пластини,  $k = 2$  мм,  $\alpha = 7^\circ$

На основі проведених досліджень можна зробити висновок, що використання молотка з кутом  $\alpha = 6,7^\circ$ , нерухомо встановлених пластин, що забезпечують зазор  $k = 2$  мм і частоту обертання ротора  $n = 3000$  об./хв, дало змогу підвищити продуктивність з 62,1 до 68,1 кг/год (9,66 %) і знизити питомі затрати корисної потужності з 6,06 до 5,71 кВт·год/т (5,76 %), а повну питому енергоємність – з 8,48 до 7,91 кВт·год/т (6,93 %).



## Висновки до 4 розділу

1. Досліджені значення коефіцієнта тертя ковзання зерен пшениці по сталевих поверхнях, що дозволило встановити його залежності від шорсткості поверхні і відносної вологості зерна та обґрунтувати максимальний кут, за якого відбувається защемлення.

2. Сила і робота руйнування зерен, а також їхня жорсткість є істотно важливими параметрами для оптимального проектування машин і устаткування для переробки зерна, на які суттєво впливають розміри та відносна вологість зерна.

3. На основі математичного планування багатofакторного експерименту та його реалізації обґрунтовано оптимальні параметри та режими роботи малогабаритної зернової дробарки –  $\alpha = 6,7^\circ$ ,  $k = 2$  мм,  $n = 3000$  об./хв. Із використанням решета з отворами 5 мм модуль подрібнення становить 1,1 мм, середньоквадратичне відхилення розмірів подрібненого зерна пшениці – 0,63 мм, а варіація – 56,96 %.

Використання молотків зі змінною товщиною робочої зони і нерухомовстановлених пластин дозволило підвищити продуктивність з 62,1 до 68,1 кг/год (9,66 %) і знизити питомі затрати корисної потужності з 6,06 до 5,71 кВт·год/т (5,76 %), а повну питому енергоємність – з 8,48 до 7,91 кВт·год/т (6,93 %) порівняно з подрібненням прямими молотками без встановлених пластин.

## РОЗДІЛ 5

### РОЗРАХУНОК ЕКОНОМІЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ ДРОБАРКИ

Для подрібнення зерна використовують машини, що відрізняються конструктивними, технологічними і техніко-економічними параметрами. У комбікормовому виробництві широко використовують молоткові дробарки, для яких актуальне зменшення питомої енергоємності процесу подрібнення.

Для дрібних селянських господарств, де використання металомісткого і енергоємного обладнання недоцільне, актуальне створення енергоефективної техніки невеликої потужності.

#### 5.1. Енергетична ефективність

Для визначення економічної ефективності проєктованої дробарки використано характеристику середніх затрат потужності на подрібнення в лабораторній установці. На основі експериментальних даних одержані середні розрахункові значення продуктивності  $Q = 68,1$  кг/год, ступінь подрібнення  $\lambda = 4$ .

Значення питомих енергозатрат ефективної і корисної потужності відносно одиничної маси готового продукту визначають за формулами:

$$q_{\text{еф}} = \frac{P_{\text{еф}}}{Q}; \quad (5.1)$$

$$q_{\text{кор}} = \frac{P_{\text{кор}}}{Q}, \quad (5.2)$$

де  $P_{\text{еф}}$  – ефективна потужність електродвигуна, кВт;

$P_{\text{кор}}$  – корисна потужність електродвигуна, кВт;

$Q$  – продуктивність дробарки, т/год.

З урахуванням ступеня подрібнення  $\lambda$

$$q_{\text{кор}} = \frac{P_{\text{кор}}}{Q\lambda}. \quad (5.3)$$

Енергоємність процесу подрібнення з урахування затрат на холостий хід двигуна для рекомендованих конструкційних параметрів становить 7,91 кВт·год/т (табл. 5.1).

Таблиця 5.1 – Техніко-економічні показники порівнюваних дробарок

Показник	БКИ-3500	Удосконалена дробарка
Питома енергоємність, кВт·год/т	11,47	7,91
Модуль подрібнення, мм	1,2	1,1

Як бачимо, для приблизно однакового модуля подрібнення значення питомої енергоємності удосконаленої дробарки нижче.

## 5.2. Економічна ефективність

За нормами залежно від віку на відгодівлю 1 свині за рік у середньому необхідно 1000–1500 кг корму, а вміст зерна пшениці у ньому досягає 60–80%. Згідно з [153] за кількістю поголів'я свиней, які одночасно утримуються господарства розподіляються на: дрібні – до 15 голів свиней; малі – до 200 голів; середні – від 201 до 3000 голів; спеціалізовані – понад 3000. Розглянемо енергетичні та економічні затрати в малому господарстві на подрібнення зерна для відгодівлі 100 свиней. Базовим варіантом виступає молоткова дробарка “Беларусь БКИ-3500” (табл. 5.2).

Згідно з умовами подібності роботи молоткових дробарок [154], збільшивши ширину ротора втричі, одержимо продуктивність, що дорівнює 0,2043 т/год, потужність електродвигуна – 2,2 кВт. З урахуванням того, що в удосконаленій дробарці встановлені додаткові робочі органи у вигляді

нерухомих пластин, коефіцієнт витрат на поточний ремонт та технічне обслуговування збільшено до 8 %.

Таблиця 5.2 – Вихідні дані для розрахунку економічної ефективності

Показник	Базова дробарка	Удосконалена дробарка
Термін експлуатації, років	8	8
Продуктивність агрегату, т/год	0,18	0,2043
Балансова вартість, грн	2500	4200
Річне завантаження, т	120	120
Потужність електродвигуна, кВт	3,5	2,2
Чисельність обслуговуючого персоналу, осіб	1	1
Годинні тарифні ставки, грн	36,11	36,11
Коефіцієнт на реновацію, %	12,5	12,5
Коефіцієнт на поточний ремонт та технічне обслуговування, %	6	8
Витрати електроенергії, кВт·год/т	11,47	7,91

За використання удосконаленої дробарки і БКИ-3500 річне навантаження машини в тонах залишається незмінним. водночас потужність встановленого двигуна менша на 37,1 %, а кількість подрібненої продукції за одну годину зростає на 13,5 %.

Вартість електроенергії становить 1,68 грн за 1 кВт [155]. Результати розрахунку вартості відображені в табл. 5.3.

Таблиця 5.3 – Розрахунок вартості електроенергії

Показник	Базова дробарка	Удосконалена дробарка
Обсяг переробленої сировини за рік, т	120	120
Річне навантаження, год	666,7	587,37
Потреба в електроенергії за рік, кВт	1496,4	949,78
Ціна 1 кВт·год електроенергії, грн/ кВт·год	1,68	1,68
Вартість електроенергії за рік, грн	2513,95	1595,63
Економія/перевитрата електроенергії, кВт год:		
у розрахунку на 1 т	–	3,56
всього за рік	–	426,62
Вартість електроенергії, грн/т	19,27	13,30
Економія/перевитрата електроенергії:		
у розрахунку на 1 т, грн	–	5,97
всього за рік, грн	–	716,72

Річне навантаження на дробарку становить 587,37 год. За рахунок нижчої питомої енергоємності у встановленого двигуна меншої потужності використання електроенергії зменшилося на 3,56 кВт·год на 1 тону, а за один рік – на 426,62 кВт·год. Це дозволяє зекономити на 1 тонні 5,97 грн, або за один рік – 716,72 грн.

Для розрахунку оплати праці (табл. 5.4) визначено, що станом на 2020 р. розмір погодинної оплати праці становить 36,11 грн.

Таблиця 5.4 – Розрахунок оплати праці

Показник	Базова дробарка	Удосконалена дробарка
Чисельність обслуговуючого персоналу, осіб	1	1
Кількість годин машини в роботі	666,67	587,37
Годинні тарифні ставки, грн	36,11	36,11
Обсяг переробленої сировини за рік, т	120	120
Фонд оплати праці, грн	24073,33	21209,99
Трудомісткість процесу, люд.-год / т	5,56	4,89
Економія/перевитрата оплати праці, люд.-год		
на 1 тонну	–	0,66
за рік	–	79,30
Фонд оплати праці на 1 тонну, грн	200,61	176,75
Економія/перевитрата оплати праці		
грн на 1 тонну	–	23,86
грн за рік	–	2863,35

Використання удосконаленої дробарки дозволить зекономити 0,66 люд.-год/т, а за рік – 79,3 люд.-год. Відповідно на одну тонну економія фонду оплати праці становить 23,86 грн, а за один рік – 2863,35 грн.

Сумарні експлуатаційні витрати (табл. 5.5)

$$E = E_{\text{оп}} + E_a + E_p + E_e, \quad (5.4)$$

де  $E_{\text{оп}}$  – витрати на оплату праці, грн;

$E_a$  – амортизаційні відрахування, грн;

$E_p$  – витрати на ремонт, грн;

$E_e$  – витрати на електроенергію, грн.

Таблиця 5.5 – Експлуатаційні витрати

Показник	Базова дробарка	Удосконалена дробарка
Обсяг переробки за рік, т	120,00	120,00
Експлуатаційні витрати, грн:	26848,19	23666,62
– оплата праці	24073,33	21209,99
– амортизація	312,50	525,00
– витрати на ремонт	150,00	336,00
– електроенергія	2312,35	1595,63
Експлуатаційні витрати з розрахунку на 1 т, грн	223,73	197,22
Економія/перевитрата фонду експлуатаційних витрат		
у розрахунку на 1 т, грн	–	26,51
у розрахунку на 1 т, %	–	11,85
всього за рік, тис. грн	–	3181,57
Термін окупності, років	–	1,32
Вартість 1 тонни продукції з урахуванням вартості дробарки на термін експлуатації	226,34	201,6

Сьогодні, під час зростання виробництва продукції тваринництва, важливе значення має не тільки використання високопродуктивних, а й енергоефективних технологій. За результатами проведених розрахунків економічної ефективності, встановлено, що річний економічний ефект від впровадження результатів досліджень і використання запропонованої малогабаритної зернової дробарки становить 3181,57 грн, або 11,85 % порівняння з базовою дробаркою БКИ-3500 (у цінах на січень 2021 р.).

Із врахуванням вартості дробарки витрати на 1 тону продукції зменшуються на 24,74 грн/т (10,93%) і становлять 201,6 грн/т, для базової дробарки – 226,34 грн/т. Термін окупності удосконаленої дробарки становить 1,32 року.

### **Висновки до розділу 5**

1. За результатами проведених розрахунків встановлено, що річний економічний ефект від впровадження результатів досліджень і використання малогабаритної зернової дробарки з комбінованим способом подрібнення в розрахунку на 1 тону продукції становить 197,22 грн/т.

2. Річний економічний ефект від використання малогабаритної зернової дробарки становитиме 3181,57 грн, або 26,51 грн/т продукції.

3. Термін окупності малогабаритної зернової дробарки становитиме 1,32 року.



## ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

Дисертація є завершеною науково-дослідною роботою, в якій виконано теоретичне узагальнення й подано новий розв'язок актуальної науково-практичної задачі з обґрунтування конструктивних параметрів та режимів роботи малогабаритної зернової дробарки. Під час виконання дисертаційної роботи одержано такі підсумкові висновки і практичні результати:

1. Згодовування тваринам зерна відбувається у різних формах після його подрібнення, для чого використовують зернові дробарки. Існуючі конструкції дробарок мають низку недоліків щодо нерівномірності гранулометричного складу продукту подрібнення, швидке зношування робочих елементів (молотків, решіт), характеризуються високою питомою енергоємністю, що в середньому становить 10 кВт·год/т, а в окремих випадках досягає 20 кВт·год/т. Зазначені фактори спонукають до необхідності проведення ґрунтовніших досліджень, спрямованих на поліпшення якісних, кількісних та енергетичних показників зернових дробарок, яких можна досягнути завдяки вдосконаленню існуючих конструкцій та розробкою для них нових робочих органів.

2. Для інтенсифікації процесу подрібнення зернового матеріалу робочу зону молотків дробарки виконано змінної товщини, а в її корпусі додатково встановлено нерухомі пластини. За таких умов руйнування зерна відбуватиметься внаслідок розколювання через удар у нього торцем молотка та перетирання в зоні заклинювання між його боковою поверхнею та пластиною.

Для опису такого процесу руйнування зернини розроблено математичну модель, яка враховує критичне значення її деформації, фізико-механічні властивості та геометричні характеристики контактуючих тіл, встановлює вплив конструктивних параметрів і режимів роботи дробарки на часові та потужнісні характеристики отримання одиниці маси подрібненого матеріалу заданої якості.

3. Досліджено явище та визначено основну умову заклинювання зернини між обертовими робочими органами дробарки і нерухомими пластинами та її руйнування перетиранням, якою є зазор і кут між ними. Змодельовавши процес

подрібнення, в якому вхідними величинами були зазор  $k$  між молотком і нерухомо встановленою пластиною та кут  $\alpha$  між їх боковими поверхнями, за допомогою програмного середовища *MathCAD* були оптимізовані їхні параметри, за яких у зазначений зазор одночасно може попасти й у подальшому подрібнитись максимальна кількість зерен (9 шт.). Це досягається, коли  $k = 1,5\text{--}2$  мм та за  $\alpha = 3,5\text{--}4,5^\circ$ . За таких значень досягаються максимальний ефект від застосування вдосконалених робочих органів дробарки та найкращі показники питомої енергоємності процесу подрібнення.

4. У процесі проведення експериментальних досліджень було визначено коефіцієнти тертя по різних третювх поверхнях, силу руйнування зерен озимої пшениці та вплив на них відносної вологості і належності до певного сорту. Встановлено, що коефіцієнт тертя зерен пшениці сорту Смуглянка зростає з 0,33 до 0,38 за умови збільшення шорсткості сталевій поверхні від  $Ra = 1,25$  мкм до  $Ra = 12,5$  мкм. Підвищення відносної вологості зерен від 12,5 % до 22,7 % призводить до зростання вказаного показника від 0,29 до 0,37 для трьох просторових розташувань зерен відносно напрямку переміщення. Встановлено, що різниця значень коефіцієнтів тертя ковзання по сталевій поверхні для трьох досліджених сортів пшениці Смуглянка, Зимоярка і Золотоколоса є статистично значущою і лежить у межах 0,28–0,36. Дослідження механічних властивостей зерен пшениці свідчать, що сила руйнування зернини залежить від її вологості і розмірів та знаходиться в межах 70–130 Н, а середнє її значення становить 100 Н. Деформація руйнування зернини пшениці коливається в межах 0,34–0,6 мм, а середнє її значення становить 0,46 мм.

5. У результаті проведення багатфакторного експерименту обґрунтовано оптимальні параметри та режими роботи малогабаритної зернової дробарки. Для забезпечення максимальної продуктивності й мінімальної питомої енергоємності удосконаленої дробарки, що становить 7,91 кВт·год/т, та модуля подрібнення 1 мм необхідна частота обертання ротора становить 3000 об./хв, зазор між молотком і пластиною – 2 мм, а кут між ними –  $6,7^\circ$ . За зростання частоти обертання ротора до 3500 об./хв і мінімального зазору 1 мм

спостерігається зменшення модуля подрібнення до 0,9 мм, зростання вмісту надмірно подрібненої фракції до 8 % і збільшення питомої енергоємності до 8,8 кВт·год/т.

6. Встановлено, що для оптимальних параметрів і режимів роботи дробарки показники якості подрібнення становлять: модуль подрібнення – 1,1 мм, середньоквадратичне відхилення розмірів подрібненого зерна пшениці – 0,63 мм, а варіація – 56,96 %. Частка надмірно подрібненого зерна (розміром менше ніж 0,212 мм) становить 4,9 % за допустимих 5 %. Вміст частинок розміром понад 3 мм становить 0,3 % і не перевищує допустимих значень (5–12 %).

7. Визначивши показники економічної ефективності використання вдосконаленої малогабаритної зернової дробарки і порівнявши їх з аналогічними, розрахованими для серійної дробарки БКИ-3500, встановили, що експлуатаційні витрати на подрібнення 1 тонни зернового матеріалу зменшуються на 10,93 % або на 24,74 грн/т і становлять 201,6 грн/т. Річний економічний ефект від використання запропонованої малогабаритної зернової дробарки становитиме 3181,57 грн, або 26,51 грн/т продукції. Термін її окупності становить 1,32 року.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Горшкова Л. М. Основи сільського господарства: навч. посіб. для студ. вищ. пед. навч. закл. / М-во освіти і науки України, Глухівський держ. пед. ун-т. Глухів: РВВ ГДПУ, 2005. 136 с.
2. Bae K., Choi J., Jang Y., et. al. Innovative vaccine production technologies: the evolution and value of vaccine production technologies. *Archives of Pharmacal Research*. 2009. Vol. 32 (4). P. 465–480. doi:10.1007/s12272-009-1400-1.
3. Leenaars M., Hendriksen C. F. M. Critical Steps in the Production of Polyclonal and Monoclonal Antibodies: Evaluation and Recommendations. *ILAR Journal*. 2005 Vol 46 (3): P. 269–79. doi:10.1093/ilar.46.3.269
4. Food and Agriculture Organization of the United nations URL: <http://www.fao.org/animal-production/en/> (дата звернення: 08.02.2021).
5. *Unklesbay N. World Food and You. Routledge, 1992. P. 179.*
6. *Walling P. Counting Sheep – A Celebration of the Pastoral Heritage of Britain. Profile Books. 2014. P. 16.*
7. Виробництво продукції тваринництва за видами. URL: [http://www.ukrstat.gov.ua/operativ/operativ2019/sg/vpt/arh\\_vpt2019\\_u.html](http://www.ukrstat.gov.ua/operativ/operativ2019/sg/vpt/arh_vpt2019_u.html). (дата звернення: 08.02.2021).
8. Щодо перспектив відновлення тваринницької галузі в Україні URL: <http://old2.niss.gov.ua/content/articles/files/tvarynnnytvo-3a8bd.pdf> (дата звернення: 23.03.2020).
9. Подпряттов Г. І. Зберігання і переробка продукції рослинництва. Київ: Мета, 2002. 495 с.
10. ДСТУ 7693:2015. Комбікормова сировина. Загальні технічні умови. [Чинний від 2016-08-01]. Київ.: Державний комітет України з питань технічного регулювання та споживчої політики, 2016.

11. Аграрний тиждень. Україна. Ціле зерно в годівлі птиці – це раціонально URL: <https://a7d.com.ua/tvarinnictvo/breeding/13845-cle-zerno-v-godvl-ptic-se-racionalno.html> (дата звернення: 23.03.2020).
12. Крохина В. А., Калашников А. П., Фисинин В. И. Комбикорма, кормовые добавки и ЗЦМ для животных (состав и применение). *Справочник /* под ред. В. А. Крохиной. Москва: Агропромиздат, 1990. 304 с.
13. Мельников С. В. Механизация и автоматизация животноводческих ферм. Ленинград: Колос, 1978. 560 с.
14. Ревенко І. І. Машины та обладнання для тваринництва: посібник-практикум. К. : Кондор, 2011. 396 с.
15. Proceedings of XXIV International Mineral Processing Congress: Beijing, China, 24 - 28 September 2008 / Edited by Dian Zuo Wang; Wang, D.Z., Ed.; Beijing: Science Press, 2008. URL: [https://www.researchgate.net/publication/270338232\\_FINGERPRINT\\_OF\\_A\\_PHOSPHORUS\\_PRODUCING\\_SUMMERGED\\_ARC\\_FURNACE\\_A\\_-\\_THE\\_LIMITS\\_OF\\_DYNAMIC\\_MODELING](https://www.researchgate.net/publication/270338232_FINGERPRINT_OF_A_PHOSPHORUS_PRODUCING_SUMMERGED_ARC_FURNACE_A_-_THE_LIMITS_OF_DYNAMIC_MODELING) (Last accessed: 23.03.2020).
16. Miao Z., Grift T. E., Hansen A. C., Ting, K. C. Energy requirement for comminution of biomass in relation to particle physical properties. *Ind. Crops Prod.* 2011. Vol. 33. P. 504–513.
17. Ревенко І. І. Машины та обладнання для тваринництва: електрон. підруч. Київ : Кондор, 2019. URL: <http://rodak.if.ua/mot/index.htm> (дата звернення: 09.02.2021).
18. Бізнес-каталог підприємств України. URL: <https://www.ua-region.com.ua/kved/Ind.15.7> (дата звернення: 25.03.2020).
19. Вітчизняне обладнання для приготування комбикормів. Державна дослідна станція птахівництва НААН URL: [http://avianua.com/ua/index.php/statty\\_po\\_pticevodstvu/tekhnolohiia-ptakhivnytstva/25-obladnannya\\_dlya\\_prigotuvannya\\_gormiv](http://avianua.com/ua/index.php/statty_po_pticevodstvu/tekhnolohiia-ptakhivnytstva/25-obladnannya_dlya_prigotuvannya_gormiv) (дата звернення: 23.03.2020).

20. Song S.-H., Lee M.-G., Lee H.-J., Yoon W.-B. Analysis of grinding kinetics to control the effect of rice flour particle size on the yield of alcohol and glucose during fermentation. *Int. J. Food Sci. Technol.* 2014. Vol. 49. P. 2703–2710.
21. Mi Dabbour, Bahnasawy A. S. Ali Z. El-Haddad Grinding. Parameters and their Effects on the Quality of Corn for Feed Processing. *J. Food Process. Technol.* 2015. 6. P. 1–7.
22. Mani S., Tabil L. G., Sokhansanj S. Grinding performance and physical properties of wheat and barley straws, corn stover and switchgrass. *Biomass Bioenergy* 2004. 27. P. 339–352.
23. Mohd Rozalli N. H., Chin N. L., Yusof Y. A. Grinding characteristics of Asian originated peanuts (*Arachis hypogaea* L.) and specific energy consumption during ultra-high speed grinding for natural peanut butter production. *J. Food Eng.* 2015. Vol 152. P. 1–7.
24. Tavares L. M. Optimum routes for particle breakage by impact. *Powder Technol.* 2004. Vol. 142. P. 81–91.
25. Shashidhar M. G., Murthy T. P. K., Girish K. G., Manohar B. Modeling of Particle Size Distribution and Energy Studies. *Grinding of Coriander Seeds: Part. Sci. Technol.* 2013. Vol. 31. P. 449–457.
26. Dziki D., Laskowski J. Influence of selected factors on wheat grinding energy requirements. *TEKA Kom. Mot. Energ. Roln.* 2005. Vol. 5. P. 56–64.
27. Mroziński A., Flizikowski J., Macko M. Inżynieria rozdrabniania biomasy. *Graffpol*, Wrocław, 2016.
28. Steyn C. W. Optimisation of a fully autogenous comminution circuit, *Pretoria, RPA: University of Pretoria*, 2013. 149 p.
29. Arif A., Nadulski R., Kobus Z., Zawislak K. The Influence of Grain Moisture Content on Specific Energy During Spring Wheat Grinding. *Agriculture and Agricultural Science Procedia.* 2015. Vol. 7, P. 309–312.
30. Kawatra S. K. *Advances in Comminution; Society for Mining, Metallurgy, and Exploration: Littleton, Colorado*, 2006.

31. Masuda H., Higashitani K., Yoshida H. Powder Technology Handbook, Third Edition, *Taylor & Francis Group, LLC*: Boca, Raton, London, New York, 2006.
32. Ермичев В. А., Купреенко А. И. Энергосбережение в технологиях кормопроизводства. *Механизация и электрификация сельского хозяйства*. 2005. № 4. С. 11–13.
33. URL: <https://propozitsiya.com/ua/zberigannya-zerna-u-shovyshchi> (дата звернення: 23.03.2020).
34. Егоров Г. А. Технологические свойства зерна. Москва: Агропромиздат, 1985. 334 с.
35. Царенко О. М. Механіко-технологічні властивості сільськогосподарських матеріалів: підручник за ред. С. С. Яцуна. Київ: Мета, 2003. 448 с.
36. ДСТУ 4508:2005. Комбікорми-концентрати для свиней. Технічні умови. [Чинний від 2008-01-01]. Київ.: Державний комітет України з питань технічного регулювання та споживчої політики, 2008.
37. ДСТУ 8589:2015. Комбікорми повнораціонні для поросят-сисунів. Технічні умови. [Чинний від 2017-01-01]. Київ.: Державний комітет України з питань технічного регулювання та споживчої політики, 2017.
38. ДСТУ 8406:2015. Комбікорми для дичини. Технічні умови. [Загальні вимоги та правила (ISO 4:1984, NEQ; ISO 832:1994, NEQ). [На заміну ДСТУ3582-97; чинний від 2013-08-22]. Вид. офіц. Київ: Мінекономрозвитку України, 2014. 15 с.
39. ДСТУ 8530:2015. Комбікорми для великої рогатої худоби. Технічні умови. [Чинний від 2016-08-01]. Київ.: Державний комітет України з питань технічного регулювання та споживчої політики, 2016.
40. ДСТУ 8167:2015. Комбікорми для свиней. Технічні умови. [Чинний від 2017-07-01]. Київ.: Державний комітет України з питань технічного регулювання та споживчої політики, 2017.
41. ДСТУ 8173:2015. Комбікорми для овець. Технічні умови. [Чинний від 2017-01-01]. Київ.: Державний комітет України з питань технічного регулювання та споживчої політики, 2017.

42. ДСТУ 4120-2002. Комбікорми повнораціонні для сільськогосподарської птиці. Вимоги до технічних та хімічних показників пташиних комбікормів (ІЕ 132305), [Чинний від 2002-01-01]. Київ: Державний комітет України з питань технічного регулювання та споживчої політики, 2002.

43. Zareiforoush H., Komarizadeh M. H., Alizadeh M. R. Effect of moisture content on some physical properties of paddy grains. *Res. J. Appl. Sci., Engi. Technol.* 2009. P. 1(3). 132–139.

44. Simonyan K. J., Yiljep Y. D., Oyatoyan O. B., Bawa G. S. Effects of Moisture Content on Some Physical Properties of Lablab purpureus (L.) Sweet Seeds. *Agricultural Engineering International: the CIGR Ejournal Manuscript.* 2009. 1279, Vol. XI. P. 13.

45. Varnamkhasti M. G., Mobli H., Jafari A. et al. Some Engineering Properties of Paddy (var. Sazandegi). *Int. j. Agri. Biol.* 2007. Vol. 9, № 5. P. 763.

46. Zaalouk A. K., Zabady F. I. Eng. Effect of moisture content on angle of repose and friction coefficient of wheat grain. *Misr J. Ag. January.* 2009. P. 418-427.

47. Karimi M., Kheiralipour K., Tabatabaeefar A. The effect of moisture content on physical properties of wheat. *Pakistan J. Nutrition.* 2009. P. 90–95.

48. Tabatabaeefar A. Moisture-dependent physical properties of wheat. *Int. Agrophysics Polish Academy Sciences.* 2003. № 17. P. 207–211.

49. Moya M., Ayuga F., Guaita M. et. al. Mechanical properties of granular agricultural materials considered in silos design. *15 th ASCE Eng. Mech. Conf. June 2-5, 2002, Columbia University, N. Y. N. Y. EM, 2002.* P. 8.

50. Gharibzahedi S. M. T., Etemad V., Mirarab-Razi J., Fos'hat M. Study on some engineering attributes of pine nut (*Pinus pinea*) to the design of processing equipment. 2010. Vol. 56, № 3. P. 99-106.

51. Gursoy S., Guzel E. Determination of Physical Properties of Some Agricultural Grains. *Res. J. Appl. Sci. Eng. Technol.* 2010. 2(5). P. 492–498.

52. Zewdu A. D., Solomon W. K. Moisture- dependent physical properties of grass pea (*Lathyrus savirus L.*) seeds. *Agr. Eng. Int. V. X.* 2008. February. P. 13.



53. Milani E., Seyed M., Razavi A. Moisture dependent physical properties of cucurbit seeds. *Int. Agrophysics. Polish Academy Sciences*. 2007. № 21. P. 157–168.
54. Khazaei J., Ghanbari S. New method for measuring the angles of repose and frictional properties of wheat grains. *Int. Agrophysics*. 2010. № 24. P. 275–286.
55. Koocheki A., Rosavi S. M. A., Milani E. Physical properties of watermelon seed as a function of moisture content and variety. *Int. Agrophysics. Polish Academy Sciences*. 2007. № 21. P. 349–359.
56. Benedetti B., Jorge J. Effect of moisture content on coefficients of friction and angle of repose for different types of grains. *6th International Postharvest Symposium*, from 8-12 of April. 2009. P. 1777–1786.
57. Казаков Е. Д. Качество зерна и факторы, его определяющие. *Хранение и переработка зерна*. Москва: ЦННИТЭИ Минзага СССР, 1976. (Сер. “Элеваторная пром-сть”).
58. Казаков Е. Д., Казакова И. Е. Однозначная оценка качества зерна. *Изв. вузов. Пищевая технология*. 1983. № 4. С. 102-105.
59. Dzikia D., Sacak-Pietrzak G., Biernacka B. et. al. The grinding energy as an indicator of wheat milling value. *Teka. Com. Mot. Energ. Agr.* 2012. Vol. 12(1). P. 29–33.
60. Ekinci K., Yilmaz D., Ertekin C. Effects of moisture content and compression positions on mechanical properties of carob pod (*Ceratonia siliqua* L.). *African Journal of Agricultural Research*. 2010. Vol. 5(10). P. 1015–1021.
61. Woźniak W., Grundas S. Ównanie właściwości mechanicznych ziarna pszenicy i jęczmienia przed oraz po nawilśaniu i suszeniu. *MOTROL*. 2006. № 8, P. 261–269.
62. Nowakowski T., Lisowski A., Klonowski J., Gendek A. Moduł sprężystości przy zginaniu łodyg wybranych roślin energetycznych. *ZESZYTY PROBLEMOWE POSTĘPÓW NAUK ROLNICZYCH*. 2009. № 543, P. 229–237.
63. Safieddin M., Najafi G., Ghobadian B., Tavakkoli T. Determination of Some Mechanical Properties of Castor Seed (*Ricinus communis* L.) to Design and Fabricate an Oil Extraction Machine. *J. Agr. Sci. Tech.* 2012. Vol. 14. P. 1219–1227.

64. Başlar M., Kalkan F., Kara M., Ertugay M. F. Correlation between the protein content and mechanical properties of wheat. *Turk J Agric For* 2012. № 36. P. 601–607.
65. Elbatawi I. E., Arafa G. K. Factors affecting breaking force distribution of wheat kernel before milling. *Misr J. Ag. Eng.* 2008. 25(3). P. 1004–1025.
66. Morris C. F., Pitts M. J., Bettge A. et. al. Compressive Strength of Wheat Endosperm: Analysis of Endosperm Bricks. *Cereal Chem.* 2008. 85(3). P. 351–358.
67. Ponce-García N., Ramírez-Wong B., Torres-Chávez P. I., et. al. Effect of Moisture Content on the Viscoelastic Properties of Individual Wheat Kernels Evaluated by the Uniaxial Compression Test Under Small Strain. *Cereal Chem.* 2013. 90(6). P. 558–563.
68. Gorji A., Rajabipour A., Tavakoli H. Fracture resistance of wheat grain as a function of moisture content, loading rate and grain orientation. *AJCS.* 2010. 4(6). P. 448–452.
69. Delwiche S. R. Wheat endosperm compressive strength properties as affected by moisture. *Transactions of the ASAE.* Vol. 2015. 43(2). P. 365–373.
70. Chandio F. A., Changying J., Tagar A. A., et. al. Comparison of mechanical properties of wheat and rice straw influenced by loading rates. *African Journal of Biotechnology.* Vol. 2013. 12(10). P. 1068–1077.
71. Skonecki S., Laskowski J. Wpływ prędkości przemieszczenia tłoka na parametry zagęszczania pszenicy. *Acta Agrophysica.* 2006. 8(4). P. 975–984.
72. Шеремета Р. Б. Огляд реологічних моделей. *Вісник Львівського національного аграрного університету: агроінженерні дослідження.* 2018. № 22. С. 22–30.
73. Піщелка В. А. Стан та перспективи розвитку комбікормової галузі в Україні. *Ефективні корми та годівля.* 2006. № 3. С. 5–8.
74. Сиденко П. М. Измельчение в химической промышленности. Москва: Химия, 1977. 368 с.

75. Елисеев В. А. Теоретическое и экспериментальное обоснование методов повышения эффективности процесса измельчения зерновых кормов на животноводческих фермах: автореф. дисс. ... д-ра техн. наук. Воронеж, 1969. 50 с.
76. Мяндр А. Я. Кормоприготовительные машины и агрегаты. Москва: Машиностроение, 1970. 256 с.
77. Жислин Я. М. Оборудование для производства комбикормов, обогатительных смесей и премиксов. Москва: Колос, 1981. 320 с.
78. Богородский А. В. Интенсификация процесса измельчения в мельницах дезинтеграторного типа. *Изв. вузов. Химия и химическая технология*. 1980. Т. 23, вып. 5. С. 643–645.
79. Елисеев В. А. Исследование процесса измельчения зерна ударом: автореф. дисс. ... канд. техн. наук. Воронеж, 1962. 20 с.
80. Мала гірнича енциклопедія: у 3 т. / за ред. В. С. Білецького. Донецьк: Схід. вид. дім, 2004–2013.
81. Мельников С. В., Плохов Ф. Г. Исследование процесса разрушения зерна ударом. *Записки ЛСХИ*. 1967. Вып. 2, т. 108. С. 212 – 218.
82. Осьмак В. Сучасний стан та перспективи розвитку машин для кормовиробництва. *Збірник наукових праць УкрНДІЛВТ ім. Л. Погорілого*. Дослідницьке, 2009. Вип. 13. С. 259 – 261.
83. Завражнов А. И., Николаев Д. И. Механизация приготовления и хранения кормов: учеб. пособие для студ. высш. учеб. завед. Москва: Агропромиздат, 1990. 336 с.
84. Технологічне обладнання зернопереробних та олійних виробництв: навч. посіб. О. В. Дацишин та ін.; за ред. О. В. Дацишина. Вінниця: Нова кн., 2009. 488 с.
85. Хацин С. М. Рынок научно-технической продукции: учеб. пособие. Ростов-на-Дону: ДГТУ, 1999. 64 с.
86. Ревенко І. І. Брагінець М. В., Ребенко В. І. Машини та обладнання для тваринництва: підручник. Київ: Кондор, 2012. 731 с.

87. NEUERO Farm URL: <https://neuero-farm.com.ua/ua/p29961062-molotkovaya-drobilka-dlya.html> (Last accessed: 16.01.2021).
88. Кормодробарка Мотор Січ КД-2. URL: <http://tnp.motorsich.com/rus/catalog/4-Blagoustroystvo-tovaryi-dlya-doma/23-Kormodrobilka-Motor-Sich-KD-2-s-elektroprivodom.html> (Last accessed: 16.01.2021).
89. ТОВ “АРІЕС-УКРАЇНА”. URL: <https://arjes.com.ua/>, Україна (дата звернення: 16.01.2021).
90. Agromech: Rozdrabniacz bijakowy Rb 3.5. URL: <https://www.agromech.pl>, Польща, (Last accessed: 16.01.2021).
91. Chyi Meang Machinery Co.: Ltd. URL: <http://www.chyimeang.com/>, Тайвань (Last accessed: 16.01.2021).
92. ГК Біоекопром. URL: <https://bioekoprom.com.ua/ua/>, Україна (дата звернення: 16.01.2021).
93. SORTECH Srl. URL: <https://www.sortech.it/>, Італія (Last accessed: 16.01.2021)
94. Buhler group. URL: [https://www.buhlergroup.com/content/buhlergroup/global/en/products/hammer\\_mill.html](https://www.buhlergroup.com/content/buhlergroup/global/en/products/hammer_mill.html) (Last accessed: 16.01.2021).
95. Акименко А. В., Сундеев А. А., Воронин В. В. Совершенствование процесса измельчения фуражного зерна. *Хранение и переработка зерна*. 2011. № 2. С. 45 – 47.
96. Гвоздев О. В., Шпиганович Т. О., Ялпачик О. В. Вдосконалення процесу подрібнення зерна. *Збірник наукових праць Вінницького національного аграрного університету. Серія «Технічні науки»*. 2011. № 9. С. 143–150.
97. Ibrahim M. M., Omran M. S., Abd Elrhman E. N. Design and Evaluation of Crushing Hammer mill. *Misr Journal of Agricultural Engineering*. 2019. 36 (1). P. 1–24.
98. Development and study of the grain crushing working process of shocking and reflective crusher. *Vestnik of Kazan State Agrarin University*. 2019. 14(1). P. 100–106.

99. Молоток кормодробарки: пат. 100670 Україна: МПК6 В02С13/28. № 201412959; заявл. 03.02.14; опубл. 10.08.15, Бюл. № 15. 2 с.
100. Молоток дробарки Охріменка: пат. 137069 Україна: МПК6 В02С 13/28. № 201903971; заявл. 16.04.19; опубл. 25.09.19, Бюл. № 18. 7 с.
101. Sven B. Strom, Ring Hammer, United States Patent US3580518A, St. Louis 1971.
102. Білецький В. С., Смирнов В. О. Технологія збагачення корисних копалин. (Вид. 2-ге). Донецьк: Схід. Вид. дім, 2009. 272 с.
103. Поярков М. С. Совершенствование рабочего процесса молотковых дробилок с жалюзийными сепараторами при одно- и двухступенчатом измельчении зерна: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Киров, 2001. 20 с.
104. Feliks J., Filipowicz A. Zastosowanie teorii rozdrabniania do doboru mocy w kruszarce węgla. *Inż. Apar. Chem.* 2009. 48. P. 42–43.
105. Kapur P. C., Schoenert K., Furstenau D. W. Energy-size relationship for breakage of single particles in a rigidly mounted roll mill. *International Journal of Mineral Processing*. 1990. № 29. P. 56–62.
106. Kick F. Das gesetz, der proportionalen widerstände und seine anwendungen. Leipzig, 1985. 235 p.
107. Процессы и аппараты химической технологии. Явления переноса, макрокинетика, подобие, моделирование, проектирование: 5. т. Т. 2: Механические и гидромеханические процессы / Д. А. Баранов и др. под. ред. А. М. Кутепова. Москва: Логос, 2002. 600 с.
108. Molendowski F. Energochłonność procesu rozdrabniania surowców roślinnych na przykładzie rdzeni kolb kukurydzy. Wrocław: Wydawnictwo Akademii Rolniczej we Wrocławiu, 2005. S. 12–14.
109. Ребиндер П. А. Физико-химические исследования процессов деформации твёрдых тел. *Сборник АН СССР*. 4.1. Москва; Ленинград: 1947. 256 с.
110. Тертишний О. О., Опарін С. О., Рябік П. В. Механічні процеси в хімічній технології. Дніпро: ДВНЗ УДХТУ, 2015. 215 с.

111. Мельников С. В. Экспериментальные основы теории процесса измельчения кормов на фермах молотковыми дробилками: дисс. ... д-ра техн. наук. Ленинград, 1969. 509 с.

112. Алешкин В. Р. Некоторые закономерности прохода частиц через решето молотковой дробилки. *Механизация сельскохозяйственного производства: Записки ЛСХИ*. Львов, 1968. Т. 119, вып. 1. С. 118–124.

113. Інформаційні технології: Системи комп'ютерної математики: навч. посіб. для студ. спец. «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології». / І. В. Кравченко та ін. Електронні текстові дані (1 файл: 5,57 Мбайт). Київ: КПІ ім. І. Сікорського, 2018. 243 с.

114. Mathcad 14 для студентов, инженеров и конструкторов. Санкт-Петербург.: БХВ-Петербург, 2007. 368 с.

115. Попов В. Л. Механика контактного взаимодействия и физика трения. Москва: Физматлит, 2012. 348 с.

116. Клепко В. Ю., Голець В. Л. Вища математика в прикладах і задачах: навч. посіб. 2-ге вид. Київ: Центр учбової літ. 2009. 594 с.

117. Кузьмінський Р. Д., Соколовський О. Р., Шеремета Р. Б. Малогабаритна молоткова дробарка комбінованої дії: пат. 113310 Україна: МПК В02С 13/04 (2006.01). № U 2016 07011; заявл. 29.06.16; опубл. 25.01.17, Бюл. № 2. 4 с.

118. Кузьмінський Р. Д., Шеремета Р. Б. Малогабаритна молоткова дробарка комбінованої дії: пат. 121453 Україна: МПК В02С 13/04 (2006.01). № U 2017 05035; заявл. 24.05.17; опубл. 11.12.17, Бюл. № 23. 5 с.

119. Кузьмінський Р. Д., Шеремета Р. Б. Малогабаритна молоткова дробарка комбінованої дії: пат. 136298 Україна: МПК В02С 13/04 (2006.01). № U 2019 02296; заявл. 06.03.2019; опубл. 12.08.19, Бюл. № 25. 4 с.

120. Кузьмінський Р. Д., Шеремета Р. Б. Малогабаритна молоткова дробарка комбінованої дії: пат. 123060 Україна: МПК В02С 13/04 (2006.01). № А 2018 09389; заявл. 17.09.19; опубл. 11.02.21, Бюл. № 6. 4 с.

121. Буртак В. В. Обґрунтування параметрів робочих елементів та вибір матеріалів за тріщиностійкістю для зернових дробарок ударно-перетиральної дії: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Львів, 2012. 20 с.
122. Клепко В. Ю., Голець В. Л. Формула трапецій. Вища математика в прикладах і задачах. 2-ге вид. Київ: Центр учбової літ. 2009. С. 449–594.
123. Погорелов А. В. Аналитическая геометрия. Москва: Наука, 1968. 176 с.
124. Рибарук В. Я., Ріпка І. І. Сільськогосподарські машини: практикум з розрахунку і досліджень робочих процесів. Львів: ЛДАУ, 1998. 264 с.
125. Тревис Дж. LabVIEW для всех. / пер. с англ. Н. А. Клушина; под ред. В. В. Шаркова, В. А. Гурьева. Москва: ДМК Пресс; Прибор Комплект, 2005. 544 с.
126. Пейч Л. И., Точилин Д. А., Поллак Б. П. LabVIEW для новичков и специалистов. Москва: Горячая линия-Телеком, 2004. 384 с.
127. Arduino. URL: <https://store.arduino.cc/arduino-uno-rev3> (Last accessed: 10.09.2020).
128. Адлер Ю. П. Введение в планирование эксперимента. Москва: Металлургия, 1969. 159 с.
129. Веденяпин Г. В. Общая методика экспериментального исследования и обработки опытных данных. Москва: Наука, 1973. 451 с.
130. Вольф В. Г. Статистическая обработка опытных данных. Москва: Колос, 1966. 254 с.
131. Хайліс Г. А., Коновалюк Д. М. Основи проектування і дослідження сільськогосподарських машин: навч. посіб. Київ: НМК ВО, 1992. 320 с.
132. Laboratory of comminution research. URL: [rozdrabnianie.utp.edu.pl](http://rozdrabnianie.utp.edu.pl) (Last accessed: 10.12.2020).
133. Fragmentation in UTP URL: [fragmentation.utp.edu.pl](http://fragmentation.utp.edu.pl) (Last accessed: 10.12.2020).

134. Дрейпер Н. Прикладной регрессионный анализ: 2 кн. Кн. 1. Москва: Финансы и статистика, 1986. 366 с.
135. Соколовський О. Р., Кузьмінський Р. Д., Шеремета Р. Б. Вплив розташування насінин пшениці і жита відносно напрямку їх переміщення по сталевих і алюмінієвих поверхнях на значення коефіцієнта тертя ковзання. *Рибне господарство України*. 2013. № 7, спец. вип. С. 20–23.
136. Шеремета Р. Б. Встановлення впливу відносної вологості на геометричні параметри насіння зернових культур. *Збірник наукових праць молодих учених, аспірантів та студентів*. Одеса, 2012. Т. 1, С. 141–143.
137. Кузьмінський Р. Д., Соколовський О. Р., Шеремета Р. Б. Математична модель геометричних параметрів насінин пшениці. *Вісник ЛНАУ Агроінженерні дослідження*. Львів, № 18, 2014. С. 171–176.
138. Буртак В. В., Кохана Т. М., Гуменюк Р. В., Шеремета Р. Б. Модернізація та аналіз роботи дробарок зернових продуктів. *Вісник Львівського національного аграрного університету: агроінженерні дослідження*. 2017. № 21. С. 124–128.
139. Sokolovskiy O., Kuzminskiy R., Sheremeta R. Effect of relativ humidity on the geometrical parameters of the seeds of wheat and rye. *MOTROL. Commission of motorization and energetics in agriculture*. Lublin, 2012. Vol. 14, № 4. P. 64–69.
140. Кузьминский Р. Д., Соколовский О. Р., Шеремета Р. Б. Определение корреляционной связи между отдельными геометрическими параметрами зерен различных культур. *MOTROL. Commission of motorization and energetics in agriculture*. Lublin; Rzeszów, 2015. Vol. 17. № 4. С. 71–74.
141. Кузьминский Р. Д., Шеремета Р. Б. Исследование механических свойств зерен пшеницы при сжатии. *MOTROL. Commission of motorization and energetics in agriculture*. Lublin; Rzeszów, 2016. Vol. 18, № 5. С. 41–45.
142. Kuzminskiy R., Kovalishyn S., Kovalchuk Yu., Sheremeta R. Mathematical models of geometric sizes of cereal crops seeds as dependent random variables. *Acta Technologica Agriculturae*, Nitra: Slovaca Universitas Agriculturae Nitriae, 2018. 3 P. 101–105.



143. Zdybel A., Gawłowski S., Laskowski J. Wpływ wilgotności na właściwości fizyczne i parametry procesu rozdrabniania ziarna pszenicy odmiany muszelka. *Acta Agrophysica*. 2011. 17(2). S. 421–431.

144. Dziki D., Laskowski J., Siastala M., Biernacka B. Influence of moisture content on the wheat kernel mechanical properties determined on the basis of shear test. *Int. Agrophys*/2010. 24, P. 237–242.

145. Kalkan F., Kara M., Bastaban S., Turgut N. Strength and frictional properties of popcorn kernel as affected by moisture content. *International Journal of Food Properties*. 2014. 14/ P. 1197–1207.

146. Kiani M., Kiani D., Minaei S. et. al. Moisture dependent physical properties of red bean (*Phaseolus vulgaris* L.) grains. *Int. Agrophysics*, 2008. 22/ P. 231–237.

147. Tavakoli H., Rajabipour A., Mohtasebi S. S. Moisture-Dependent Some Engineering Properties of Soybean Grains. *Agricultural Engineering International* 2009.Vol. XI. P. 123–125.

148. Bart-Plange A., Addo A., Akowuah J. O., Ampah J. Some moisture dependent compressive properties of shea kernel (*vitellaria paradoxa* l). *Canadian journal of pure and applied sciences*. 2012. Vol. 6, № 3. P. 2113–2119.

149. Брандт З. Анализ данных. Статистические и вычислительные методы для научных работников и инженеров. Москва: Мир, 2003. 686 с.

150. Веденяпин Г. В. Общая методика экспериментального исследования и обработки опытных данных. Москва: Наука, 1973. 451 с.

151. Вознесенский В. А. Статистические методы планирования эксперимента в технико-экономических исследованиях. Москва: Статистика, 1974. 175 с.

152. Коруняк П. С. Обґрунтування параметрів робочих елементів та вибір матеріалів за тріщиностійкістю для зернових дробарок ударно-перетиральної дії. автореф. дис. ... канд. техн. наук. Львів, 2000. 20 с.

153. Інструкція щодо утримання свиней з метою недопущення поширення інфекційних хвороб. URL: <http://www.consumer.gov.ua/Pictures/Files/Editor/documentпроекти%20для%20обговорення/Інструкція-утримання%20свиней/ІНСТРУКЦІЯ.pdf> (дата звернення: 12.01.2021).

154. Марченко О. С., Дацишин О. В., Лавріненко Ю. М. та ін. Механізація та автоматизація у тваринництві і птахівництві. Київ: Урожай, 1995. 416 с.

155. Постанова Кабінету Міністрів України №1325 від 28.12.2020 р.: URL: <https://index.minfin.com.ua/ua/tariff/electric/> (дата звернення: 15.01.2021).

## **ДОДАТКИ**

Число зернин  $W$  як функція від зазору ( $k$ ) між молотком і нерухомо встановленою пластиною та кута ( $\alpha$ )

$$\begin{aligned}
 W(k, \alpha) := & \left\{ \begin{array}{l} \text{if } \alpha < 3.4 \\ \left[ \left[ \frac{2 \cdot k + b \cdot \tan\left(\alpha \cdot \frac{3.14}{180}\right)}{2} \right] \cdot b \cdot \frac{(R - R_1) \cdot p \cdot j}{10^6 \cdot m} \right] \text{ if } k < h - b \cdot \tan\left(\alpha \cdot \frac{3.14}{180}\right) \\ 0 \text{ if } k \geq h \\ \left[ \frac{(k + h)}{2} \right] \cdot \frac{(h - k)}{\tan\left(\alpha \cdot \frac{3.14}{180}\right)} \cdot \frac{(R - R_1) \cdot p \cdot j}{10^6 \cdot m} \text{ otherwise} \\ \text{otherwise} \\ \left[ \left[ \frac{2 \cdot k + \frac{(hm - hm1)}{2}}{2} \right] \cdot \left[ \frac{(hm - hm1)}{2} \right] \cdot \frac{(R - R_1) \cdot p \cdot j}{10^6 \cdot m} \right] \text{ if } k < h - b \cdot \tan\left(\alpha \cdot \frac{3.14}{180}\right) \\ 0 \text{ if } k \geq h \\ \left[ \frac{(k + h)}{2} \right] \cdot \frac{(h - k)}{\tan\left(\alpha \cdot \frac{3.14}{180}\right)} \cdot \frac{(R - R_1) \cdot p \cdot j}{10^6 \cdot m} \text{ otherwise} \end{array} \right.
 \end{aligned}$$

де  $k$  – зазор між молотком і пластиною, м;

$\alpha$  – кут боковими площинами молотка і пластини, град;

$b$  – ширина молотка, м;

$R$  – відстань від осі ротора дробарки до максимально віддаленої точки молотка, м;

$R_1$  – радіус меншої дуги пластини, м;

$p$  – насипна щільність зерна (натура), кг/дм<sup>3</sup>;

$j$  – коефіцієнт заповнення;

$m$  – середня маса однієї зернини, кг;

$hm$  – товщина молотка, м;

$hm1$  – товщина передньої грані молотка, м.

Функція для визначення повних еліптичних інтегралів першого роду  $K(e_1)$   
та другого роду  $E(e_1)$  залежно від зміни параметра  $e_1$

```
function dr_K_E
clc;
N=1000; T=pi/2; h1=T/N;
N2=500; h2=1/N2;
fi=[0:h1:T];
e1=[h2:h2:1-h2];
F=sin(fi).^2;
for i=1:N2-1
    e=e1(i);
    F1=(1-e^2*F).^0.5;
    s1=0;k1=0;
    for j=1:N
        x=F1(j); y=F1(j+1);
        s1=s1+(x+y)/2*h1;
        k1=k1+(1/x+1/y)/2*h1;
    end

    E(i)=s1; K(i)=k1;

end

F=(1./e1.^2-1).*(K./E-1);

z=[e1' F' K' E']
for j=1:49
    F3(j)=F(j+1); F2(j)=F(50+j);
    e3(j)=e1(j+1); e2(j)=e1(50+j);
end
%a1=length(e3)
%a2=length(F3)
```

*Продовження додатку Б*

```
z1=[e3' F3' e2' F2' ];  
figure  
grid off  
hold on  
plot(e1,E,'k',e1,K,'r');  
axis([0 1.1 0 3.5]);
```

```
hold off  
grid on;
```

```
figure  
grid off  
hold on  
plot(e1,F,'k');  
hold off  
grid on;
```

Значення функції  $F(e)$  з урахуванням зміни параметра  $e_1$ 

e	F(e)	e	F(e)	e	F(e)	e	F(e)
0.0200	0.4999	0.2700	0.4858	0.5200	0.4411	0.7700	0.3373
0.0300	0.4998	0.2800	0.4847	0.5300	0.4385	0.7800	0.3308
0.0400	0.4997	0.2900	0.4835	0.5400	0.4357	0.7900	0.3240
0.0500	0.4995	0.3000	0.4823	0.5500	0.4328	0.8000	0.3168
0.0600	0.4993	0.3100	0.4811	0.5600	0.4299	0.8100	0.3094
0.0700	0.4991	0.3200	0.4798	0.5700	0.4268	0.8200	0.3016
0.0800	0.4988	0.3300	0.4784	0.5800	0.4237	0.8300	0.2934
0.0900	0.4985	0.3400	0.4770	0.5900	0.4204	0.8400	0.2848
0.1000	0.4981	0.3500	0.4755	0.6000	0.4171	0.8500	0.2758
0.1100	0.4977	0.3600	0.4740	0.6100	0.4136	0.8600	0.2662
0.1200	0.4973	0.3700	0.4724	0.6200	0.4100	0.8700	0.2562
0.1300	0.4968	0.3800	0.4708	0.6300	0.4062	0.8800	0.2455
0.1400	0.4963	0.3900	0.4691	0.6400	0.4024	0.8900	0.2341
0.1500	0.4957	0.4000	0.4674	0.6500	0.3984	0.9000	0.2220
0.1600	0.4951	0.4100	0.4655	0.6600	0.3943	0.9100	0.2090
0.1700	0.4945	0.4200	0.4637	0.6700	0.3900	0.9200	0.1951
0.1800	0.4938	0.4300	0.4617	0.6800	0.3856	0.9300	0.1800
0.1900	0.4931	0.4400	0.4597	0.6900	0.3810	0.9400	0.1637
0.2000	0.4923	0.4500	0.4577	0.7000	0.3762	0.9500	0.1457
0.2100	0.4915	0.4600	0.4555	0.7100	0.3713	0.9600	0.1258
0.2200	0.4907	0.4700	0.4533	0.7200	0.3662	0.9700	0.1033
0.2300	0.4898	0.4800	0.4510	0.7300	0.3608	0.9800	0.0774
0.2400	0.4889	0.4900	0.4487	0.7400	0.3553	0.9900	0.0460
0.2500	0.4879	0.5000	0.4463	0.7500	0.3495	—	—
0.2600	0.4869	0.5100	0.4437	0.7600	0.3435	—	—

Функція залежності часу руйнування  $t_p$  насінини від кута  $\alpha$  між боковими поверхнями нерухомо встановленої пластини і молотка, а також від відстані між віссю обертання і робочою зоною молотка  $R$

```
function t_r
clc
N=200; h=(150-130)/N;
R=[130:h:150];
alf=[1 2 4 6 8 10];
s=['k' 'b' 'g' 'r' 'c' 'm' ];
[X,Y]=meshgrid(130:1:150,1:0.2:10);
dta=0.46; om=314;
T=1000*dta/om./(X.*tan(pi/180.*Y));

figure
surf(X,Y,T);
axis([130 150 0 12 0 0.6 ]);
figure
surf(Y,X,T);
axis([0 12 130 150 0 0.6 ]);

figure
grid off
hold on
for j=1:6
    a=alf(j); d=s(j);
    z=tan(pi/180*a);
    t1=1000*dta/om/z./R;
plot(R,t1,d);
end
hold off
grid on;
```



БАЗОВА СХЕМА З'ЄДНАНЬ ПЕРЕТВОРЮВАЧА  
ЧАСТОТИ СТРУМУ WEG CFW 08 Plus

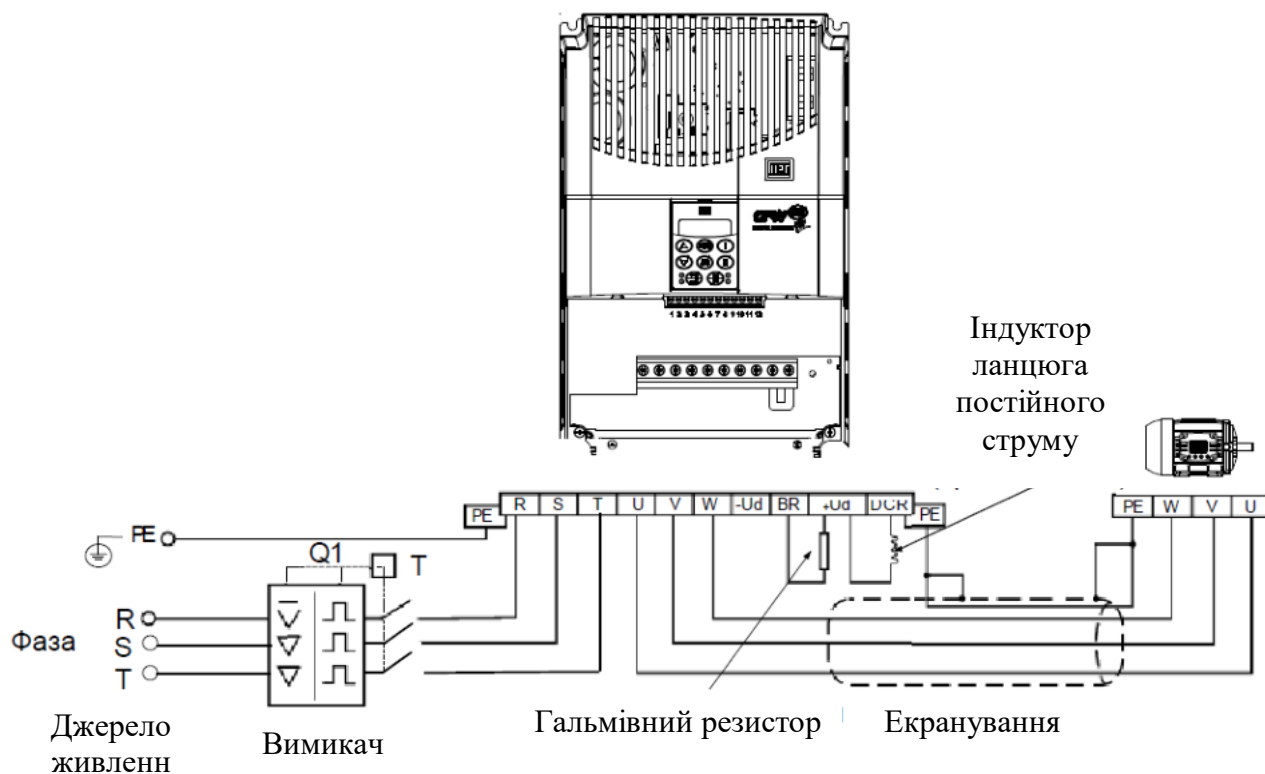
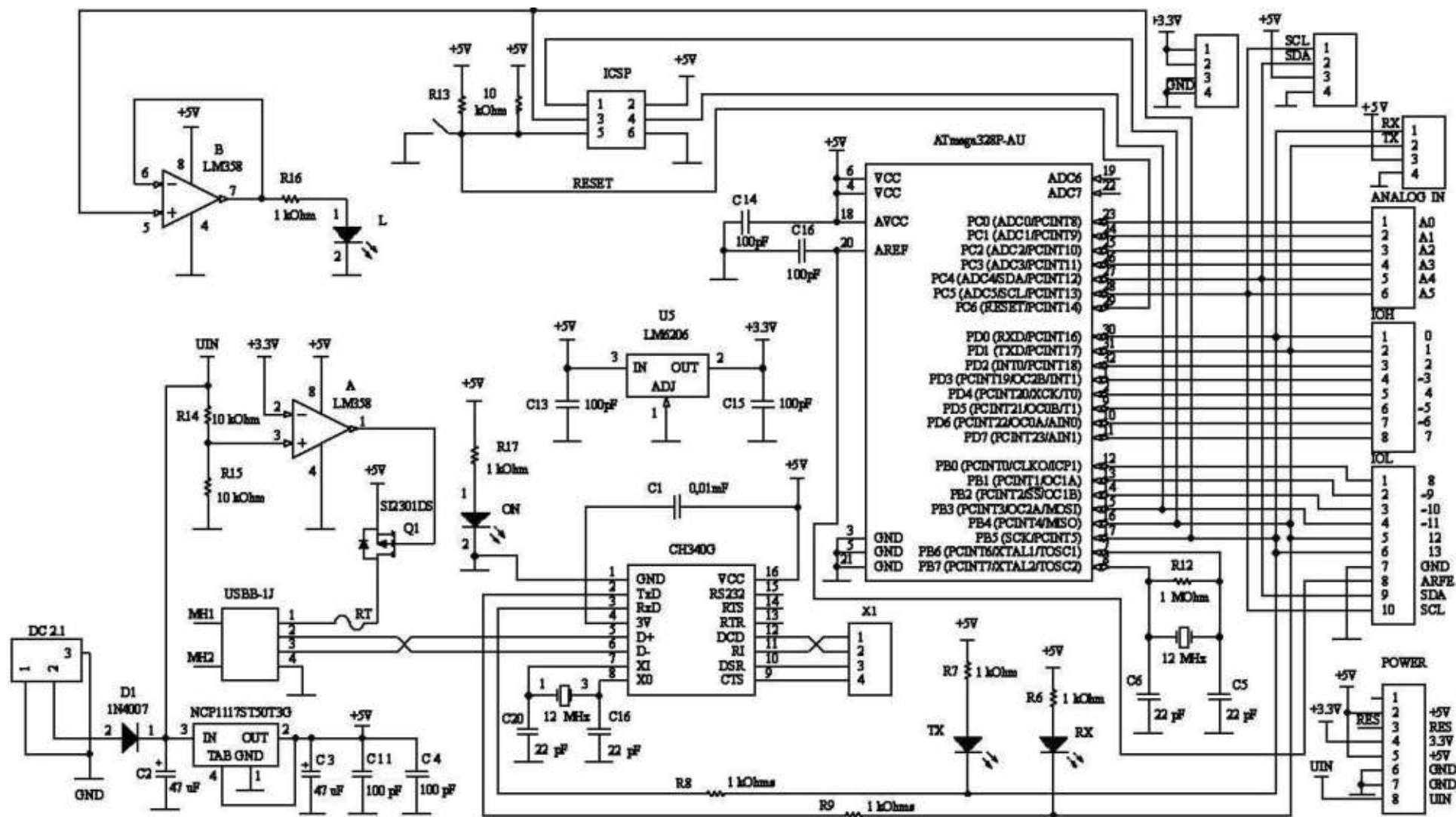


Схема принципова електрична *Arduino UNO R3*



Аналітично отримані результати для визначення рівняння регресії спожитої корисної поружності  $N_{кор}$ 

	Regressn (Coeff.)	Std.Err.	t(64)	p	-95,% (Cnf.Limt)	+95,% (Cnf.Limt)
Mean/Interc.	189	2,24766546	84,0872469	0,00000000450811855	183,222192	194,777808
(1)Оберти ротора n, об./хв(L)	34,05	1,37640837	24,7382977	0,00000201317402	30,5118296	37,5881704
Оберти ротора n, об./хв(Q)	24,675	2,02601826	12,179061	0,0000659728599	19,4669543	29,8830457
(2)Зазор k, мм(L)	-20,55	1,37640837	-14,930162	0,0000243966408	-24,0881704	-17,0118296
Зазор k, мм(Q)	9,975	2,02601826	4,92345019	0,00438438261	4,76695426	15,1830457
(3)Кут $\alpha$ , град.(L)	-3,6	1,37640837	-2,61550284	0,0473540748	-7,13817035	-0,0618296462
Кут $\alpha$ , град.(Q)	1,575	2,02601826	0,777386872	0,472090876	-3,63304574	6,78304574
1L by 2L	-11,85	1,94653538	-6,08773932	0,00172984483	-16,8537285	-6,8462715
1L by 3L	0,75	1,94653538	0,385299957	0,715861651	-4,2537285	5,7537285
2L by 3L	1,05	1,94653538	0,53941994	0,612741585	-3,9537285	6,0537285

Аналітично отримані результати для визначення рівняння регресії продуктивності  $Q$ 

	Regressn (Coeff.)	Std.Err.	t(64)	p	-95,% (Cnf.Limt)	+95,% (Cnf.Limt)
Mean/Interc.	68,1	0,129743336	524,882448	0,00000000000047640545	67,7664841	68,4335159
(1)Оберти ротора n, об./хв(L)	2,7125	0,0794512429	34,1404351	0,000000405484912	2,50826408	2,91673592
Оберти ротора n, об./хв(Q)	1,825	0,116949063	15,6050844	0,0000196359835	1,52437286	2,12562714
(2)Зазор k, мм(L)	-2,475	0,0794512429	-31,1511804	0,000000639953082	-2,67923592	-2,27076408
Зазор k, мм(Q)	-1,7	0,116949063	-14,536243	0,0000278144251	-2,00062714	-1,39937286
(3)Кут $\alpha$ , град.(L)	-0,5375	0,0794512429	-6,76515534	0,00107217327	-0,741735922	-0,333264078
Кут $\alpha$ , град.(Q)	0,075	0,116949063	0,641304839	0,549561526	-0,225627137	0,375627137
1L by 2L	0,075	0,112361025	0,667491239	0,534024487	-0,213833211	0,363833211
1L by 3L	0	0,112361025	0	1	-0,288833211	0,288833211
2L by 3L	0,225	0,112361025	2,00247372	0,101617979	-0,0638332106	0,513833211

Аналітично отримані результати для визначення рівняння регресії модуля подрібнення  $M$ 

	Regressn (Coeff.)	Std.Err.	t(64)	p	-95,% (Cnf.Limt)	+95,% (Cnf.Limt)
Mean/Interc.	1,10766667	0,00974479918	113,66747	0,000000000999454027	1,08261686	1,13271647
(1)Оберти ротора n, об./хв(L)	-0,07975	0,00596744641	-13,3641753	0,000041964925	-0,0950898094	-0,0644101906
Оберти ротора n, об./хв(Q)	0,0215416667	0,00878384328	2,45241929	0,0577643022	-0,00103792132	0,0441212547
(2)Зазор k, мм(L)	0,126375	0,00596744641	21,1774001	0,00000435131888	0,111035191	0,141714809
Зазор k, мм(Q)	0,0272916667	0,00878384328	3,10703024	0,0266401979	0,00471207868	0,0498712547
(3)Кут $\alpha$ , град.(L)	0,002625	0,00596744641	0,439886648	0,678382983	-0,0127148094	0,0179648094
Кут $\alpha$ , град.(Q)	0,0242916667	0,00878384328	2,76549409	0,0395760438	0,00171207868	0,0468712547
1L by 2L	0,0175	0,00843924365	2,07364555	0,0928084681	-0,00419376643	0,0391937664
1L by 3L	0,0045	0,00843924365	0,53322314	0,616719495	-0,0171937664	0,0261937664
2L by 3L	0,00125	0,00843924365	0,148117539	0,888038014	-0,0204437664	0,0229437664





(11) **113310**(19) **UA**(51) МПК  
B02C 13/04 (2006.01)(21) Номер заявки: **u 2016 07011**(22) Дата подання заявки: **29.06.2016**(24) Дата, з якої є чинними права на корисну модель: **25.01.2017**(46) Дата публікації відомостей про видачу патенту та номер бюлетеня: **25.01.2017, Бюл. № 2**(72) Винахідники:  
**Кузьмінський Роман  
Данилович, UA,  
Соколовський Олег  
Романович, UA,  
Шеремета Роман  
Богданович, UA**(73) Власник:  
**ЛЬВІВСЬКИЙ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ АГРАРНИЙ  
УНІВЕРСИТЕТ,  
вул. Володимира Великого, 1,  
м. Дубляни, Жовківський р-н,  
Львівська обл., 80381, UA**

(54) Назва корисної моделі:

**МАЛОГАБАРИТНА МОЛОТКОВА ДРОБАРКА КОМБІНОВАНОЇ ДІЇ**

(57) Формула корисної моделі:

Малогабаритна молоткова дробарка комбінованої дії, що містить корпус із завантажувальною і вивантажувальною горловинами та решето, всередині якого розміщена робоча камера з ротором, на якому шарнірно закріплені молотки, яка відрізняється тим, що на внутрішній поверхні корпусу додатково встановлені нерухомі пластини у вигляді сектора кільця.

(11) 113310

Пронумеровано, прошито металевими  
люверсами та скріплено печаткою  
2 арк.  
25.01.2017



Уповноважена особа

(підпис)





ДЕРЖАВНА СЛУЖБА  
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ  
ВЛАСНОСТІ  
УКРАЇНИ

УКРАЇНА

(19) **UA** (11) **113310** (13) **U**  
(51) МПК  
**B02C 13/04** (2006.01)

## (12) ОПИС ДО ПАТЕНТУ НА КОРИСНУ МОДЕЛЬ

<p>(21) Номер заявки: <b>u 2016 07011</b></p> <p>(22) Дата подання заявки: <b>29.06.2016</b></p> <p>(24) Дата, з якої є чинними права на корисну модель: <b>25.01.2017</b></p> <p>(46) Публікація відомостей про видачу патенту: <b>25.01.2017, Бюл.№ 2</b></p>	<p>(72) Винахідник(и): <b>Кузьмінський Роман Данилович (UA), Соколовський Олег Романович (UA), Шеремета Роман Богданович (UA)</b></p> <p>(73) Власник(и): <b>ЛЬВІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ АГРАРНИЙ УНІВЕРСИТЕТ, вул. Володимира Великого, 1, м. Дубляни, Жовківський р-н, Львівська обл., 80381 (UA)</b></p>
---	---

## (54) МАЛОГАБАРИТНА МОЛОТКОВА ДРОБАРКА КОМБІНОВАНОЇ ДІЇ

### (57) Реферат:

Малогабаритна молоткова дробарка комбінованої дії містить корпус із завантажувальною і вивантажувальною горловинами та решето, всередині якого розміщена робоча камера з ротором, на якому шарнірно закріплені молотки. На внутрішній поверхні корпусу додатково встановлені нерухомі пластини у вигляді сектора кільця.

UA 113310 U

## UA 113310 U

Корисна модель належить до галузі машинобудування і стосується молоткових дробарок, які можуть бути використані для подрібнення сухих зернових матеріалів.

Відома малогабаритна молоткова дробарка комбінованої дії (Патент України 83237, В02С 13/00; опубл. 27.08.2013, Бюл. № 11), що містить корпус з вивантажувальною горловиною, бокову кришку із завантажувальною горловиною, решето, молотковий ротор з горизонтальною віссю обертання та привод.

Недоліком такої малогабаритної молоткової дробарки комбінованої дії є низька ефективність роботи та значна тривалість процесу подрібнення до заданого показника ступеня подрібнення.

В основу корисної моделі поставлена задача підвищити ефективність роботи малогабаритної дробарки комбінованої дії.

Поставлена задача вирішується тим, що в малогабаритній молотковій дробарці комбінованої дії, що містить корпус із завантажувальною і вивантажувальною горловинами та решето, всередині якого розміщена робоча камера з ротором, на якому шарнірно закріплені молотки, згідно з корисною моделлю, на внутрішній поверхні корпусу додатково встановлені нерухомі пластини у вигляді сектора кільця.

Встановлення нерухомих пластин сприяє інтенсифікації процесу подрібнення за рахунок додаткового перетирання подрібнюваного матеріалу, який потрапив у простір між молотком і пластиною, що в свою чергу підвищує ефективність роботи малогабаритної молоткової дробарки комбінованої дії.

Суть корисної моделі пояснюється кресленням, де на фіг. 1 схематично зображено малогабаритна молоткова дробарка комбінованої дії, на фіг. 2 зображено переріз робочої камери малогабаритної молоткової дробарки комбінованої дії, а на фіг. 3 - схема взаємодії частинки подрібнюваного матеріалу з боковими поверхнями молотка і пластини.

Малогабаритна молоткова дробарка комбінованої дії містить завантажувальну 1 та вивантажувальну 2 горловини, корпус 3 з рифленою внутрішньою поверхнею 4 всередині якого знаходиться робоча камера 5 з ротором. Ротор складається з вала 6, на якому розміщені диски 7, на яких за допомогою осей 8 шарнірно закріплені молотки 9. У нижній частині корпусу 3 міститься решето 10. На внутрішній поверхні корпусу нерухомо закріплені набір пластин 11 таким чином, що пластина 11 розташована на однаковій відстані між двома сусідніми молотками 9. Рівномірне розміщення молотків відносно нерухомих пластин забезпечується за допомогою втулок 12.

Інші елементи (привід, пристрої керування та регулювання подачі сировини в робочу камеру тощо) виконані відповідно до відомих рішень і на кресленні не позначені.

Дробарка працює таким чином.

Зерновий матеріал потрапляє в робочу камеру через завантажувальну горловину 1. Під час руху вала 6 обертаються диски 7 з молотками 9, які шарнірно закріплені на осях 8. Внаслідок удару молотком 9 зернина 13 частково руйнується і відкидається до рифленої поверхні 4 корпусу 3, від удару з якою продовжується руйнування подрібнюваного матеріалу. Крім того, зернина руйнується ударяючись об торець пластини 11.

Додатково відбувається процес перетирання подрібнюваного матеріалу, який потрапив у простір між молотком 9 і пластиною 11 при відносному русі молотка 9 вздовж пластини 11.

Подрібнення здійснюється і внаслідок взаємодії між зернинами та продуктами подрібнення.

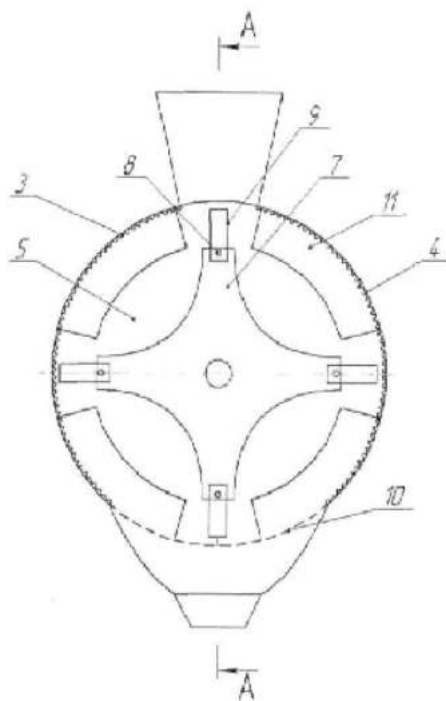
Продукти подрібнення просіваються крізь решето 10 і видаляються з машини через вивантажувальну горловину 2.

Дана корисна модель сприяє інтенсифікації подрібнення перероблюваного матеріалу.

## ФОРМУЛА КОРИСНОЇ МОДЕЛІ

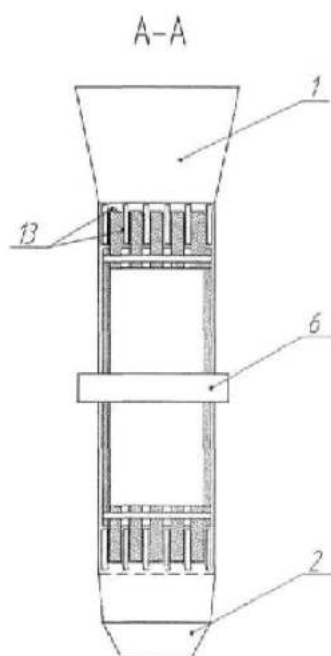
50 Малогабаритна молоткова дробарка комбінованої дії, що містить корпус із завантажувальною і вивантажувальною горловинами та решето, всередині якого розміщена робоча камера з ротором, на якому шарнірно закріплені молотки, яка **відрізняється** тим, що на внутрішній поверхні корпусу додатково встановлені нерухомі пластини у вигляді сектора кільця.

UA 113310 U

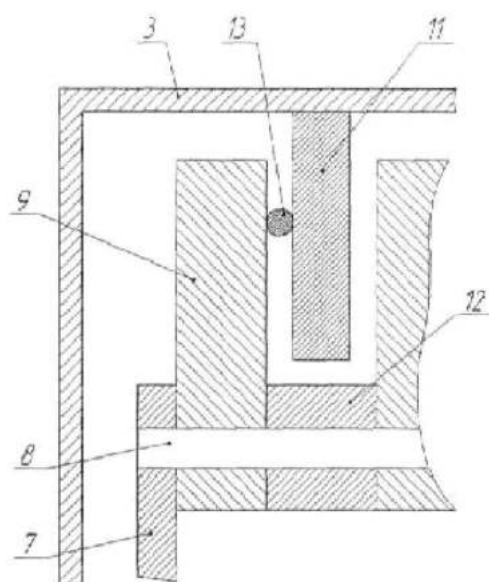


Фиг. 1

UA 113310 U



Фиг. 2



Фиг. 3







МІНІСТЕРСТВО  
ЕКОНОМІЧНОГО  
РОЗВИТКУ І ТОРГІВЛІ  
УКРАЇНИ

УКРАЇНА

(19) **UA** (11) **121453** (13) **U**  
(51) МПК  
**B02C 13/04** (2006.01)

## (12) ОПИС ДО ПАТЕНТУ НА КОРИСНУ МОДЕЛЬ

<p>(21) Номер заявки: <b>u 2017 05035</b></p> <p>(22) Дата подання заявки: <b>24.05.2017</b></p> <p>(24) Дата, з якої є чинними права на корисну модель: <b>11.12.2017</b></p> <p>(46) Публікація відомостей про видачу патенту: <b>11.12.2017, Бюл.№ 23</b></p>	<p>(72) Винахідник(и): <b>Кузьмінський Роман Данилович (UA), Шеремета Роман Богданович (UA)</b></p> <p>(73) Власник(и): <b>ЛЬВІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ АГРАРНИЙ УНІВЕРСИТЕТ, вул. Володимира Великого, 1, м. Дубляни, Жовківський р-н, Львівська обл., 80381 (UA)</b></p>
--	---

## (54) МАЛОГАБАРИТНА МОЛОТКОВА ДРОБАРКА КОМБІНОВАНОЇ ДІЇ

### (57) Реферат:

Малогабаритна молоткова дробарка комбінованої дії містить корпус із завантажувальною і вивантажувальною горловиною та решето, всередині якого розміщена робоча камера з ротором, на якому шарнірно закріплені молотки, на внутрішній поверхні корпусу встановлені нерухомі пластини у вигляді сектора кільця. Нерухомі пластини у вигляді сектора кільця виконані із змінною радіальною товщиною, яка збільшується в напрямку від центра до внутрішньої поверхні корпусу.

UA 121453 U

UA 121453 U

Корисна модель належить до галузі машинобудування і стосується молоткових дробарок, які можуть бути використані для подрібнення сухих зернових матеріалів.

Відома малогабаритна молоткова дробарка комбінованої дії (описана в патенті України 113310, В02С 13/00; опубл. 25.01.2017, Бюл. № 2), що містить корпус із завантажувальною і вивантажувальною горловиною та решето, всередині якого розміщена робоча камера з ротором, на якому шарнірно закріплені молотки, на внутрішній поверхні корпусу додатково встановлені нерухомі пластини у вигляді сектора кільця.

Недоліком такої малогабаритної молоткової дробарки комбінованої дії є невисока ефективність роботи та значна тривалість процесу подрібнення до заданого показника ступеня подрібнення.

В основу корисної моделі поставлена задача підвищити ефективність роботи малогабаритної дробарки комбінованої дії.

Поставлена задача вирішується тим, що в малогабаритній молотковій дробарці комбінованої дії, що містить корпус із завантажувальною і вивантажувальною горловиною та решето, всередині якого розміщена робоча камера з ротором, на якому шарнірно закріплені молотки, на внутрішній поверхні корпусу додатково встановлені нерухомі пластини у вигляді сектора кільця, згідно з корисною моделлю, нерухомі пластини у вигляді сектора кільця виконані із змінною радіальною товщиною, яка збільшується в напрямку від центра до внутрішньої поверхні корпусу.

Встановлення нерухомих пластин у вигляді сектора кільця із змінною радіальною товщиною сприяє інтенсифікації процесу подрібнення за рахунок кращого перетирання подрібнюваного матеріалу, що потрапив у простір між молотком і пластиною за допомогою відцентрової сили, що в свою чергу підвищує ефективність роботи малогабаритної молоткової дробарки комбінованої дії.

На фіг. 1 схематично зображена малогабаритна молоткова дробарка комбінованої дії, на фіг. 2 зображено переріз робочої камери малогабаритної молоткової дробарки комбінованої дії, на фіг. 3 - схема взаємодії частинки подрібнюваного матеріалу з боковими поверхнями молотка і пластини, а на фіг. 4 - тривимірна модель нерухомих пластин у вигляді сектора із змінною радіальною товщиною.

Малогабаритна молоткова дробарка комбінованої дії містить завантажувальну 1 та вивантажувальну 2 горловини, корпус 3 з рифленою внутрішньою поверхнею 4, в середині якого знаходиться робоча камера 5 з ротором. Ротор складається з вала 6, на якому розміщені диски 7, на яких за допомогою осей 8 шарнірно закріплені молотки 9. У нижній частині корпусу 3 міститься решето 10. На внутрішній поверхні корпусу нерухомо закріплені набір пластин 11 таким чином, що пластина 11 розташована на однаковій відстані між двома сусідніми молотками 9. Рівномірне розміщення молотків відносно нерухомих пластин забезпечується за допомогою втулок 12.

Інші елементи (привід, пристрої керування та регулювання подачі сировини в робочу камеру тощо) виконані відповідно до відомих рішень і на кресленні не позначені.

Дробарка працює таким чином.

Зерновий матеріал потрапляє в робочу камеру через завантажувальну горловину 1. Під час руху вала 6 обертаються диски 7 з молотками 9, які шарнірно закріплені на осях 8. Внаслідок удару молотком 9 зернина 13 частково руйнується і відкидається до рифленої поверхні 4 корпусу 3, від удару з якою продовжується руйнування подрібнюваного матеріалу. Крім того, зернина руйнується ударяючись об торець пластини 11.

Додатково відбувається процес перетирання подрібнюваного матеріалу, який за рахунок відцентрової сили потрапив у простір між молотком 9 і пластиною 11 при відносному русі молотка 9 вздовж пластини 11.

Подрібнення здійснюється і внаслідок взаємодії між зернинами та продуктами подрібнення.

Продукти подрібнення просіваються крізь решето 10 і видаляються з машини через вивантажувальну горловину 2.

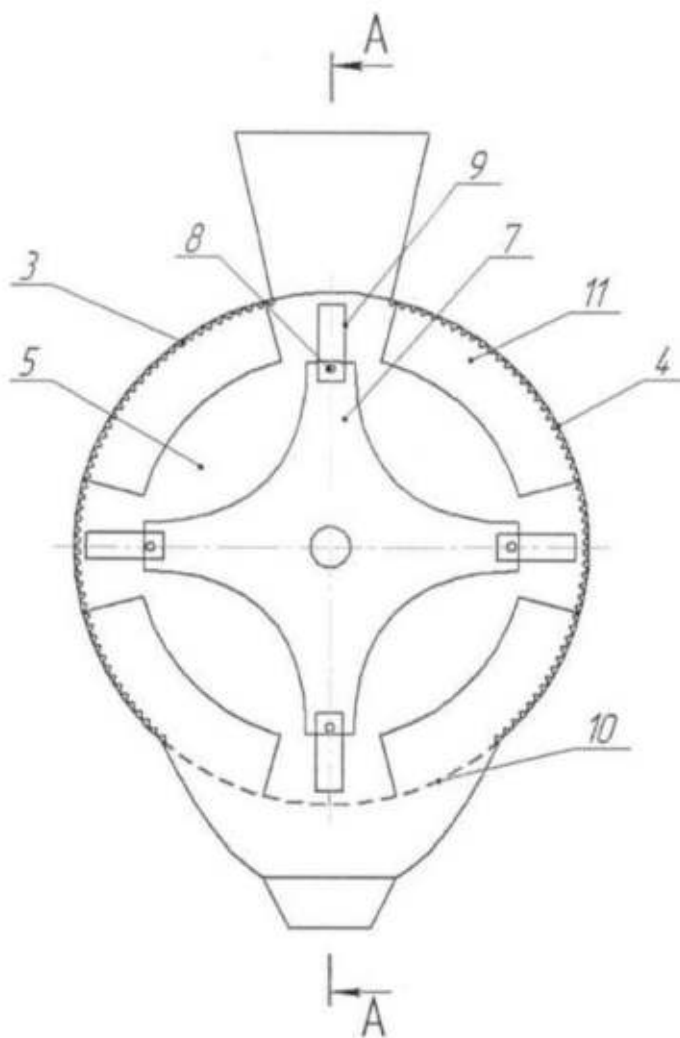
Дана корисна модель сприяє інтенсифікації подрібнення перероблюваного матеріалу.

#### ФОРМУЛА КОРИСНОЇ МОДЕЛІ

Малогабаритна молоткова дробарка комбінованої дії, що містить корпус із завантажувальною і вивантажувальною горловиною та решето, всередині якого розміщена робоча камера з ротором, на якому шарнірно закріплені молотки, на внутрішній поверхні корпусу встановлені нерухомі пластини у вигляді сектора кільця, яка **відрізняється** тим, що нерухомі пластини у

UA 121453 U

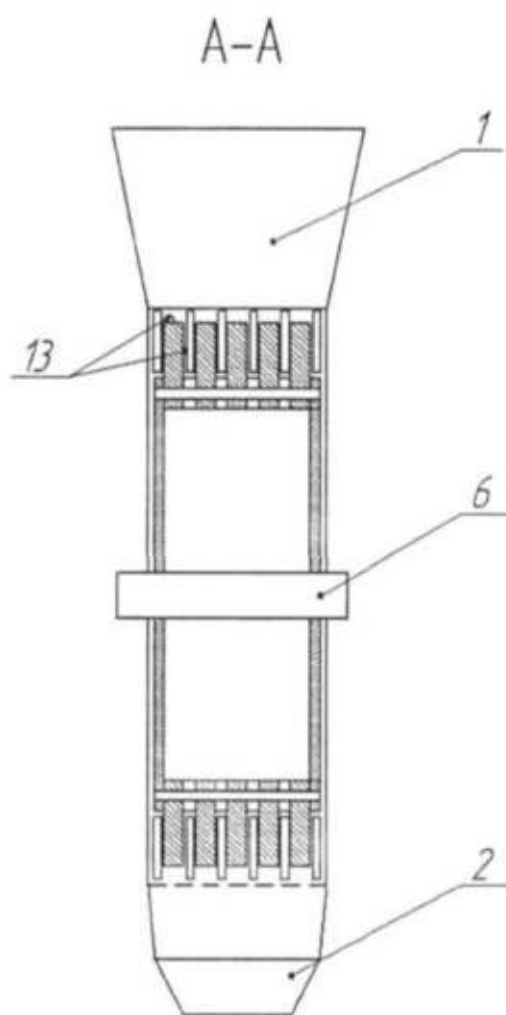
вигляді сектора кільця виконані із змінною радіальною товщиною, яка збільшується в напрямку від центра до внутрішньої поверхні корпусу.



Фиг. 1

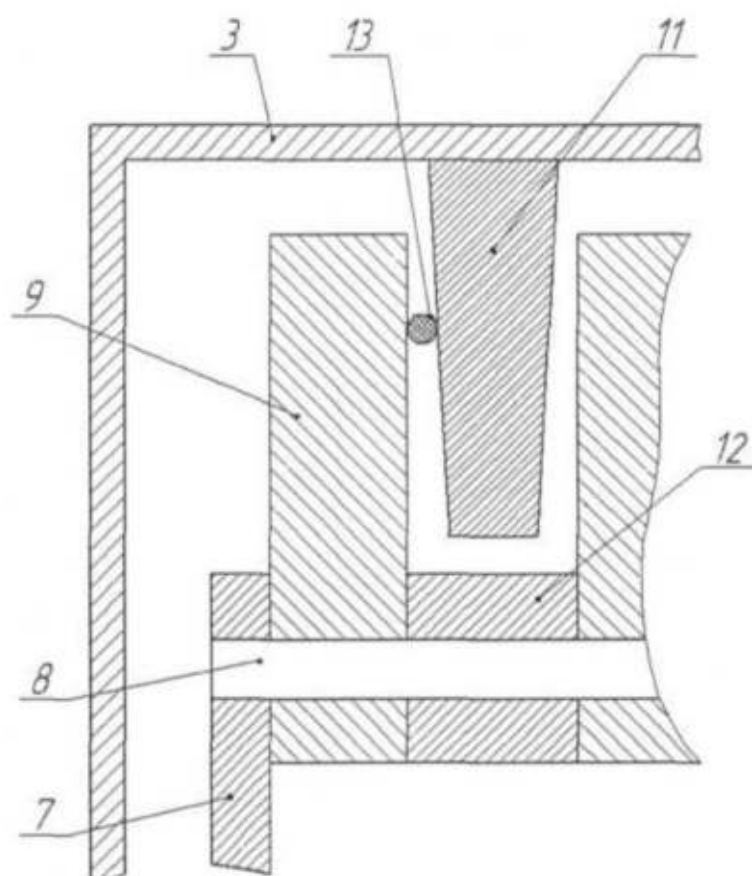


UA 121453 U



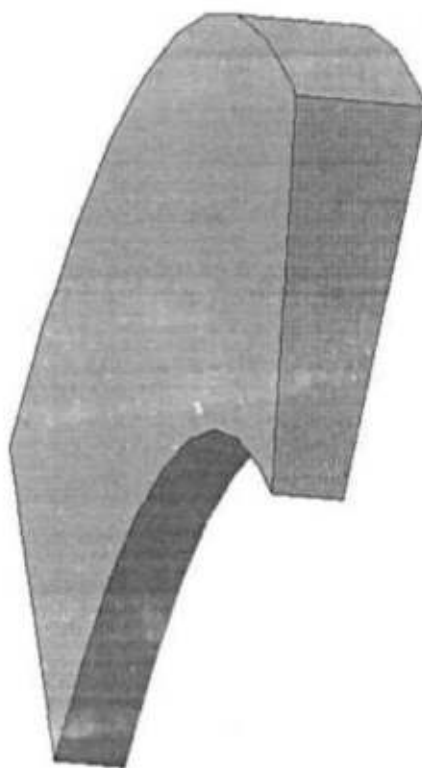
Фиг. 2

UA 121453 U



Фиг. 3

UA 121453 U



Фіг. 4

---

Комп'ютерна верстка О. Рябко

---

Міністерство економічного розвитку і торгівлі України, вул. М. Грушевського, 12/2, м. Київ, 01008, Україна

---

ДП "Український інститут інтелектуальної власності", вул. Глазунова, 1, м. Київ – 42, 01601





МІНІСТЕРСТВО  
ЕКОНОМІЧНОГО  
РОЗВИТКУ І ТОРГІВЛІ  
УКРАЇНИ

УКРАЇНА

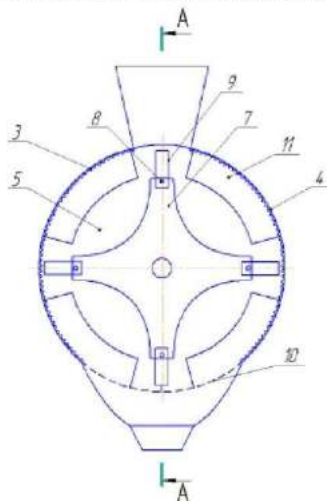
(19) **UA** (11) **136298** (13) **U**  
(51) МПК  
**B02C 13/04** (2006.01)

**(12) ОПИС ДО ПАТЕНТУ НА КОРИСНУ МОДЕЛЬ**

(21) Номер заявки: <b>u 2019 02296</b>	(72) Винахідник(и): <b>Кузьмінський Роман Данилович (UA), Шеремета Роман Богданович (UA)</b>
(22) Дата подання заявки: <b>06.03.2019</b>	(73) Власник(и): <b>ЛЬВІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ АГРАРНИЙ УНІВЕРСИТЕТ, вул. Володимира Великого, 1, м. Дубляни, Жовківський р-н, Львівська обл., 80381 (UA)</b>
(24) Дата, з якої є чинними права на корисну модель: <b>12.08.2019</b>	(74) Представник: <b>Ривюк Мар'яна Іванівна, реєстр. №474</b>
(46) Публікація відомостей про видачу патенту: <b>12.08.2019, Бюл.№ 15</b>	

**(54) МАЛОГАБАРИТНА МОЛОТКОВА ДРОБАРКА КОМБІНОВАНОЇ ДІЇ****(57) Реферат:**

Малогабаритна молоткова дробарка комбінованої дії містить корпус із завантажувальною і вивантажувальною горловиною та решето, всередині якого розміщена робоча камера з ротором, на якому шарнірно закріплені молотки, на внутрішній поверхні корпусу встановлені нерухомі пластини у формі сектора кільця. Нерухомі пластини у формі сектора кільця виконані із змінною товщиною по дузі, яка збільшується в напрямку обертання молотка.



Фіг. 1

UA 136298 U



UA 136298 U

Корисна модель належить до галузі машинобудування і стосується молоткових дробарок, які можуть бути використані для подрібнення сухих зернових матеріалів.

Відома малогабаритна молоткова дробарка комбінованої дії [описана в патенті України 113310, В02С 13/00; опубл. 25.01.2017, Бюл. № 2], що містить корпус із завантажувальною і вивантажувальною горловиною та решето, всередині якого розміщена робоча камера з ротором, на якому шарнірно закріплені молотки, на внутрішній поверхні корпусу додатково встановлені нерухомі пластини у формі сектора кільця.

Недоліком такої малогабаритної молоткової дробарки комбінованої дії є невисока ефективність роботи та значна тривалість процесу подрібнення до заданого показника ступеня подрібнення.

В основу корисної моделі поставлено задачу підвищити ефективність роботи малогабаритної дробарки комбінованої дії.

Поставлена задача вирішується тим, що в малогабаритній молотковій дробарці комбінованої дії, що містить корпус із завантажувальною і вивантажувальною горловиною та решето, всередині якого розміщена робоча камера з ротором, на якому шарнірно закріплені молотки, на внутрішній поверхні корпусу додатково встановлені нерухомі пластини у формі сектора кільця, згідно з корисною моделлю, нерухомі пластини у формі сектора кільця виконані із змінною товщиною по дузі, яка збільшується в напрямку обертання молотка.

Встановлення нерухомих пластин у формі сектора кільця із змінною товщиною по дузі, яка збільшується в напрямку обертання молотка, а зазор між молотком і пластиною відповідно зменшується, сприяє інтенсифікації процесу подрібнення за рахунок кращого перетирання подрібнюваного матеріалу, що потрапив у простір між молотком і пластиною, що в свою чергу підвищує ефективність роботи малогабаритної молоткової дробарки комбінованої дії.

На фіг. 1 схематично зображена малогабаритна молоткова дробарка комбінованої дії, на фіг. 2 зображено переріз робочої камери малогабаритної молоткової дробарки комбінованої дії, на фіг. 3 - схема взаємодії частинки подрібнюваного матеріалу з боковими поверхнями молотка і пластини, а на фіг. 4 - тривимірний модель нерухомих пластини у формі сектора зі змінною товщиною по дузі.

Малогабаритна молоткова дробарка комбінованої дії містить завантажувальну 1 та вивантажувальну 2 горловини, корпус 3 з рифленою внутрішньою поверхнею 4 в середині якого знаходиться робоча камера 5 з ротором. Ротор складається з вала 6, на якому розміщені диски 7, на яких за допомогою осей 8 шарнірно закріплені молотки 9. У нижній частині корпусу 3 міститься решето 10. На внутрішній поверхні корпусу нерухомо закріплені набір пластин 11 таким чином, що пластина 11 розташована на однаковій відстані між двома сусідніми молотками 9. Рівномірне розміщення молотків відносно нерухомих пластин забезпечується за допомогою втулок 12.

Інші елементи (привід, пристрої керування та регулювання подачі сировини в робочу камеру тощо) виконані відповідно до відомих рішень і на кресленні не позначені.

Дробарка працює таким чином.

Зерновий матеріал потрапляє в робочу камеру через завантажувальну горловину 1. Під час руху вала 6 обертаються диски 7 з молотками 9, які шарнірно закріплені на осях 8. Внаслідок удару молотком 9 зернина 13 частково руйнується і відкидається до рифленої поверхні 4 корпусу 3, від удару з якою продовжується руйнування подрібнюваного матеріалу. Крім цього зернина руйнується, ударяючись об торець пластини 11.

Додатково відбувається процес перетирання подрібнюваного матеріалу, який потрапив у простір між молотком 9 і пластиною 11 при відносному русі молотка 9 вздовж пластини 11.

Подрібнення здійснюється і внаслідок взаємодії між зернинами та продуктами подрібнення.

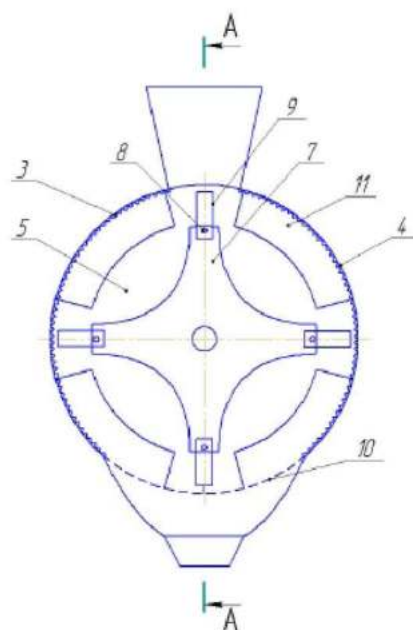
Продукти подрібнення просіваються крізь решето 10 і видаляються з машини через вивантажувальну горловину 2.

Дана корисна модель сприяє інтенсифікації подрібнення перероблюваного матеріалу.

#### ФОРМУЛА КОРИСНОЇ МОДЕЛІ

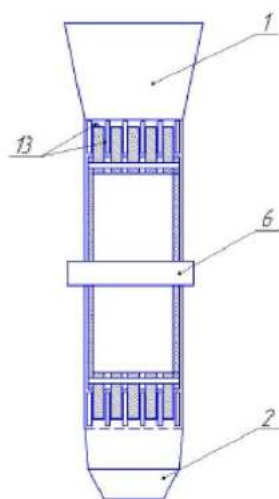
Малогабаритна молоткова дробарка комбінованої дії, що містить корпус із завантажувальною і вивантажувальною горловиною та решето, всередині якого розміщена робоча камера з ротором, на якому шарнірно закріплені молотки, на внутрішній поверхні корпусу встановлені нерухомі пластини у формі сектора кільця, яка **відрізняється** тим, що нерухомі пластини у формі сектора кільця виконані із змінною товщиною по дузі, яка збільшується в напрямку обертання молотка.

UA 136298 U



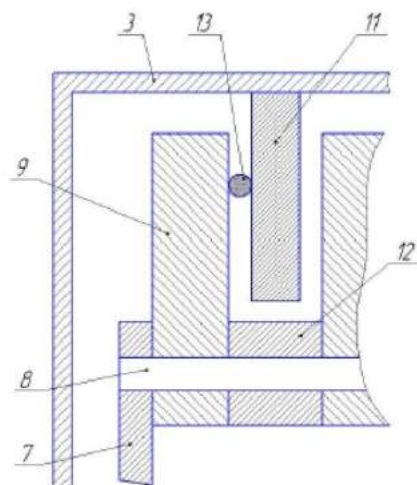
Фіг. 1

A-A

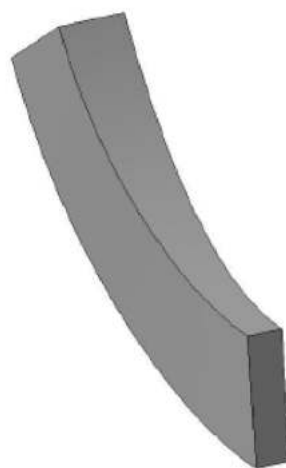


Фіг. 2

UA 136298 U



Фіг. 3



Фіг. 4

---

Комп'ютерна верстка А. Крижанівський

---

Міністерство економічного розвитку і торгівлі України, вул. М. Грушевського, 12/2, м. Київ, 01008, Україна

---

ДП "Український інститут інтелектуальної власності", вул. Глазунова, 1, м. Київ – 42, 01601







УКРАЇНА

(19) **UA** (11) **123060** (13) **C2**

(51) МПК

**B02C 13/04** (2006.01)**B02C 13/28** (2006.01)**B02C 13/282** (2006.01)

НАЦІОНАЛЬНИЙ ОРГАН  
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ  
ВЛАСНОСТІ  
ДЕРЖАВНЕ ПІДПРИЄМСТВО  
"УКРАЇНСЬКИЙ ІНСТИТУТ  
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ  
ВЛАСНОСТІ"

**(12) ОПИС ДО ПАТЕНТУ НА ВІНАХІД**

<p>(21) Номер заявки: <b>а 2018 09389</b></p> <p>(22) Дата подання заявки: <b>17.09.2018</b></p> <p>(24) Дата, з якої є чинними права інтелектуальної власності: <b>11.02.2021</b></p> <p>(41) Публікація відомостей про заяву: <b>11.02.2019, Бюл.№ 3</b></p> <p>(46) Публікація відомостей про державну реєстрацію: <b>10.02.2021, Бюл.№ 6</b></p>	<p>(72) Винахідник(и): <b>Кузьмінський Роман Данилович (UA), Шеремета Роман Богданович (UA)</b></p> <p>(73) Володілець (володільці): <b>Кузьмінський Роман Данилович, вул. Зелена, 3, кв. 76-а, м. Дубляни, Жовківський р-н, Львівська обл., 80381 (UA), Шеремета Роман Богданович, вул. Шевченка, 29, кв. 102, м. Дубляни, Жовківський р-н, Львівська обл., 80381 (UA)</b></p> <p>(56) Перелік документів, взятих до уваги експертизою: UA 121453 U, 11.12.2017 UA 113310 U, 25.01.2017 SU 1258472 A1, 23.09.1986 SU 273168 A1, 15.06.1970 UA 20196 U, 15.01.2007 JP 3124928 B2, 15.01.2001 RU 2615001 C1, 03.04.2017 CN 105833944 A, 10.08.2016 SU 1065013 A1, 07.01.1984</p>
--	---

UA 123060 C2

**(54) МАЛОГАБАРИТНА МОЛОТКОВА ДРОБАРКА КОМБІНОВАНОЇ ДІЇ****(57) Реферат:**

Винахід належить до галузі машинобудування і стосується молоткових дробарок, які можуть бути використані для подрібнення сухих зернових матеріалів. Малогабаритна молоткова дробарка комбінованої дії містить корпус із завантажувальною і вивантажувальною горловинами та решето, робочу камеру з ротором, на якому шарнірно закріплені молотки. На внутрішній поверхні корпусу встановлені нерухомі пластини у формі сектора кільця. Згідно з винаходом, молотки виконані із змінною товщиною, яка збільшується в двох площинах: в радіальному напрямку - від центра до внутрішньої поверхні корпусу, та в тангенціальному - протилежному до напрямку обертання молотка. При цьому молотки розташовані так, що зазор між молотком і пластиною зменшується у вказаних радіальному і тангенціальному напрямках. Технічний результат винаходу: підвищення ефективності роботи дробарки комбінованої дії за рахунок інтенсифікації подрібнення перероблюваного матеріалу.

## UA 123060 C2

Винахід належить до галузі машинобудування і стосується молоткових дробарок, які можуть бути використані для подрібнення сухих зернових матеріалів.

Відома малогабаритна молоткова дробарка комбінованої дії [Патент України на корисну модель № 121453, МПК В02С 13/04; опубл. 11.12.2017; Бюл. № 23], що містить корпус із завантажувальною і вивантажувальною горловиною та решето. Всередині корпусу розміщена робоча камера з ротором, на якому шарнірно закріплені молотки. На внутрішній поверхні корпусу встановлені нерухомі пластини у вигляді сектора кільця.

Недоліком такої малогабаритної молоткової дробарки комбінованої дії є невисока ефективність роботи, значна тривалість процесу подрібнення до заданого показника ступеня подрібнення та технологічна складність виготовлення пластини зі змінною товщиною.

В основу винаходу поставлено задачу підвищити ефективність роботи малогабаритної дробарки комбінованої дії шляхом зміни форми молотків.

Поставлена задача вирішується тим, що в малогабаритній молотковій дробарці комбінованої дії, що містить корпус із завантажувальною і вивантажувальною горловинами та решето, всередині корпусу розміщена робоча камера з ротором, на якому шарнірно закріплені молотки, на внутрішній поверхні корпусу встановлені нерухомі пластини у вигляді сектора кільця, згідно з виходом, молотки виконані із змінною товщиною, яка збільшується в двох площинах: в радіальному напрямку - від центра до внутрішньої поверхні корпусу, та в тангенціальному - протилежному до напрямку обертання молотка, і молотки розташовані так, що зазор між молотком пластиною зменшується у вказаних радіальному і тангенціальному напрямках.

Встановлення молотків зі змінною товщиною забезпечує зменшення зазору між молотком і пластиною в двох площинах: в радіальному напрямку - від центра до внутрішньої поверхні корпусу, та в тангенціальному - протилежному до напрямку обертання молотка. Це сприяє інтенсифікації процесу подрібнення за рахунок кращого перетирання подрібнюваного матеріалу, що потрапив у простір між молотком і пластиною, що, в свою чергу, підвищує ефективність роботи малогабаритної молоткової дробарки комбінованої дії. Форма молотків буде залежати від властивостей подрібнюваного матеріалу, а зокрема залежності навантаження від деформації подрібнюваного матеріалу.

На Фіг. 1 схематично зображена малогабаритна молоткова дробарка комбінованої дії, на Фіг. 2 зображена схема взаємодії частинки подрібнюваного матеріалу з боковими поверхнями молотка із змінною товщиною в двох площинах і нерухомої пластини у вертикальному розрізі, а на Фіг. 3 - схема взаємодії частинки подрібнюваного матеріалу з боковими поверхнями молотка із змінною товщиною в двох площинах і нерухомої пластини у горизонтальному розрізі.

Малогабаритна молоткова дробарка комбінованої дії містить, як зображено на Фіг. 1: завантажувальну 1 та вивантажувальну 2 горловини, корпус 3 з рифленою внутрішньою поверхнею 4. Всередині корпусу 3 знаходиться робоча камера 5 з ротором. Ротор складається з вала 6, на якому розміщені диски 7, на яких за допомогою осей 8 шарнірно закріплені молотки 9. У нижній частині корпусу 3 міститься решето 10. На внутрішній поверхні корпусу нерухомо закріплені набір пластин 11, розташованих на однаковій відстані між двома сусідніми молотками 9.

Інші елементи (привід, пристрої керування та регулювання подачі сировини в робочу камеру тощо) виконані відповідно до відомих рішень і на кресленні не позначені.

Дробарка працює таким чином.

Зерновий матеріал потрапляє в робочу камеру 5 через завантажувальну горловину 1. Під час руху вала 6 обертаються диски 7 з молотками 9, які шарнірно закріплені на осях 8. Внаслідок удару молотком 9 зерна 12 частково руйнується і відкидається до внутрішньої рифленої поверхні 4 корпусу 3, від удару з якою продовжується руйнування подрібнюваного матеріалу. Крім того, зерна руйнується, ударяючись об торець пластини 11.

Додатково відбувається процес перетирання подрібнюваного матеріалу. Завдяки дії відцентрової сили подрібнюваний матеріал 12 (Фіг. 2) рухається в радіальному напрямку, від центра до внутрішньої поверхні корпусу 3, і защемляється в зазорі між молотком 9 і пластиною 11, який зменшується. Защемлений матеріал 12 руйнується внаслідок зменшення зазору між молотком 9 і пластиною 11 під час переміщення молотка 9 відносно пластини 11 в тангенціальному напрямку Фіг. 3.

Продукти подрібнення просіваються крізь решето 10 і видаляються з машини через вивантажувальну горловину 2.

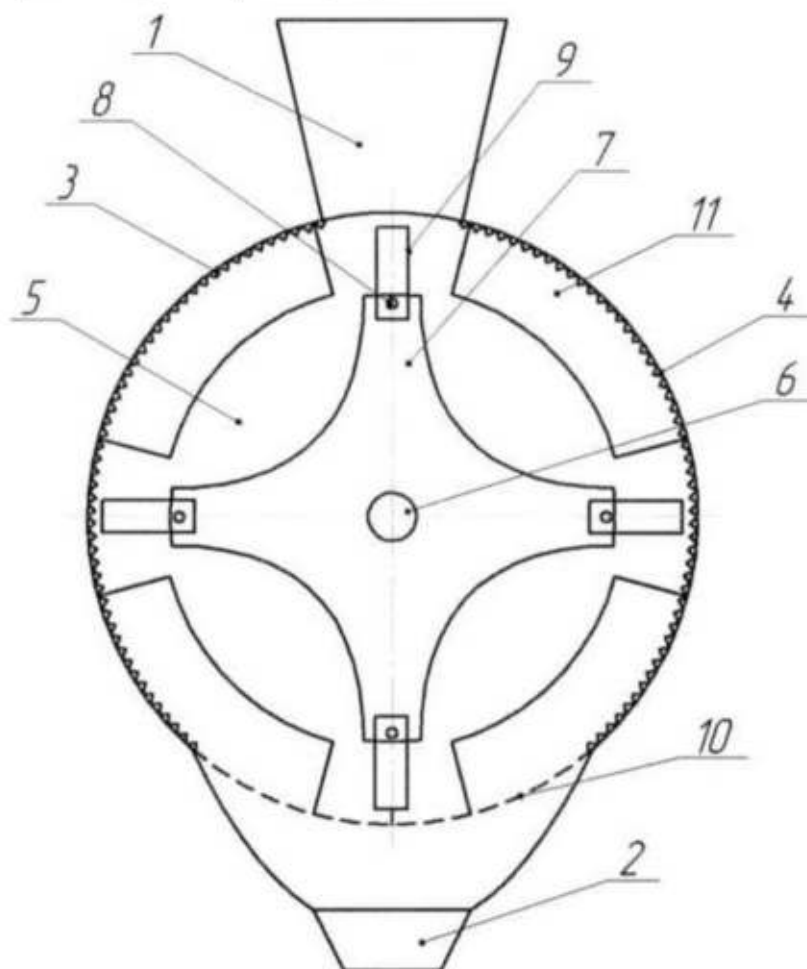
Даний винахід сприяє інтенсифікації подрібнення перероблюваного матеріалу.



UA 123060 C2

## ФОРМУЛА ВИНАХОДУ

- Малогабаритна молоткова дробарка комбінованої дії, що містить корпус із завантажувальною і вивантажувальною горловинами та решето, всередині корпусу розміщена робоча камера з ротором, на якому шарнірно закріплені молотки, на внутрішній поверхні корпусу встановлені нерухомі пластини у формі сектора кільця, яка **відрізняється** тим, що молотки виконані із змінною товщиною, яка збільшується в двох площинах: в радіальному напрямку - від центра до внутрішньої поверхні корпусу, та в тангенціальному - протилежному до напрямку обертання молотка, і молотки розташовані так, що зазор між молотком і пластиною зменшується у вказаних радіальному і тангенціальному напрямках.



Фиг. 1

UA 123060 C2

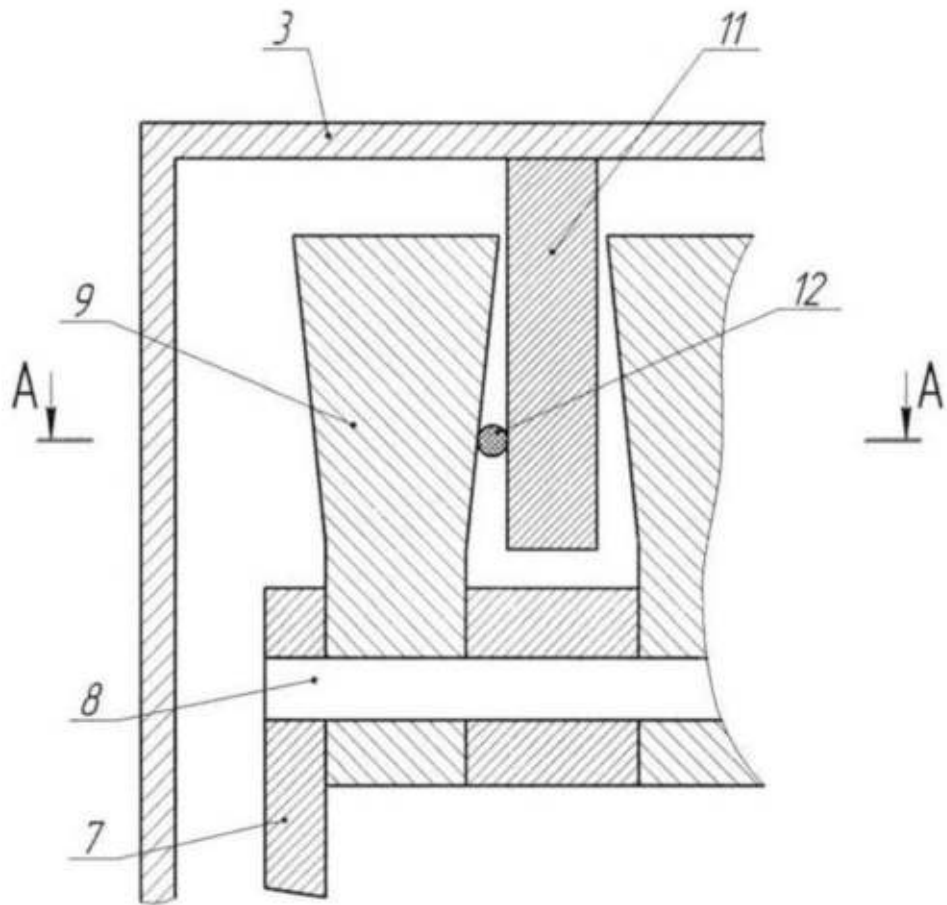
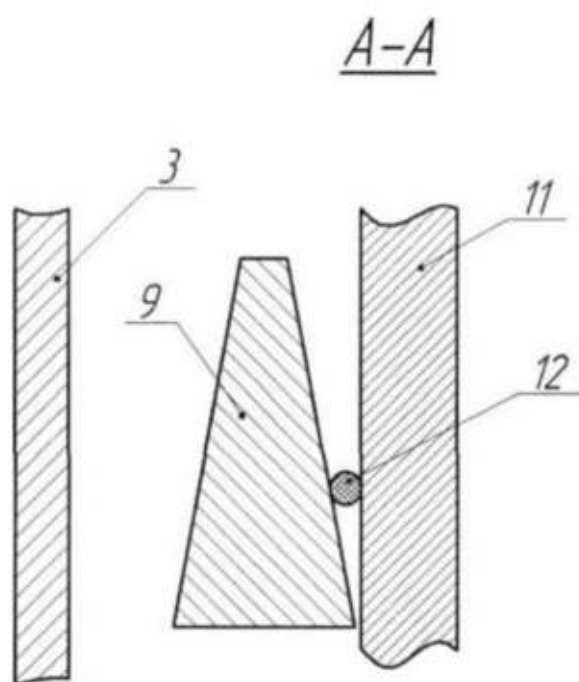


Fig. 2

UA 123060 C2



Фіг. 3

## СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ШЕРЕМЕТИ Р.Б. ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

### *Статті у наукових фахових виданнях*

1. **Шеремета Р. Б.** Встановлення впливу відносної вологості на геометричні параметри насіння зернових культур. *Збірник наукових праць молодих учених, аспірантів та студентів*. Одеса, 2012. Т. 1. С. 141-143.
2. Соколовський О. Р., Кузьмінський Р. Д., **Шеремета Р. Б.** Вплив розташування насіння пшениці і жита відносно напрямку їх переміщення по сталевих і алюмінієвих поверхнях на значення коефіцієнта тертя ковзання. *Рибне господарство України*. Керч, 2013. № 7, спец. вип. С. 20-23 (здобувач дослідив вплив на значення коефіцієнта тертя ковзання розташування насіння пшениці і жита відносно напрямку їх переміщення по сталевих і алюмінієвих поверхнях).
3. Кузьмінський Р. Д., Соколовський О. Р., **Шеремета Р. Б.** Математична модель геометричних параметрів насіння пшениці. *Вісник Львівського національного аграрного університету: агроінженерні дослідження*. 2014. № 18. С. 171-176 (здобувач запропонував математичну модель геометричних параметрів насіння пшениці).
4. Буртак В. В., Кохана Т. М, Гуменюк Р. В., **Шеремета Р. Б.** Модернізація та аналіз роботи дробарок зернових продуктів. *Вісник Львівського національного аграрного університету: агроінженерні дослідження: Агроінженерні дослідження*. 2017. № 21. С. 124-128 (здобувач провів аналіз роботи дробарок зернових продуктів).
5. **Шеремета Р. Б.** Огляд реологічних моделей. *Вісник Львівського національного аграрного університету: агроінженерні дослідження: Агроінженерні дослідження*. 2018. № 22. С. 22-30.

**Статті у міжнародних виданнях**

6. Sokolovskiy O., Kuz'minskiy R., **Sheremeta R.** Effect of relativ humidity on the geometrical parameters of the seeds of wheat and rye. MOTROL, Commission of motorization and energetics in agriculture. Lublin, 2012. Vol. 14, No. 4. P. 64-69 (здобувач дослідив вплив відносної вологості зерен пшениці на їх геометричні параметри ).

7. Кузьминский Р. Д., Соколовский О. Р., **Шеремета Р. Б.** Определение корреляционной связи между отдельными геометрическими параметрами зерен различных культур. MOTROL, Commission of motorization and energetics in agriculture. Lublin; Rzeszów, 2015. Vol. 17, No. 4. P. 71-74 (здобувач визначив кореляційний зв'язок між окремими геометричними параметрами зернових культур).

8. Кузьминский Р. Д., **Шеремета Р. Б.** Исследование механических свойств зерен пшеницы при сжатии. MOTROL, Commission of motorization and energetics in agriculture. Lublin: Rzeszów, 2016. Vol. 18, No. 5. P. 41-45 (здобувач дослідив механічні властивості зерен пшениці).

9. Kuz'minskyj R., Kovalishyn S., Kovalchuk Yu., **Sheremeta R.** Mathematical models of geometric sizes of cereal crops seeds as dependent random variables. *Acta Technologica Agriculturae*. Nitra: Slovaca Universitas Agriculturae Nitriae, 2018. No. 3. P. 101–105 (здобувач описав математичну модель геометричних параметрів зерна пшениці як залежних випадкових величин). (Scopus).

**Матеріали доповідей на наукових конференціях і семінарах**

10. **Шеремета Р. Б.** Дослідження геометричних параметрів насіння пшениці і жита. *Наукові здобутки молоді – вирішенню проблем харчування людства у XXI столітті*: матеріали 78 Міжнар. наук. конф. молодих учених, аспірантів і студентів; 2-3 квіт. 2012 р. Київ: НУХТ, 2012. Ч. 2. С. 93-94.



11. Кузьминский Р. Д., Соколовский О. Р., **Шеремета Р. Б.** Моделювання геометричних параметрів насінин сільськогосподарських культур з використанням багатовимірних розподілів. *Роль науки у підвищенні технологічного рівня і ефективності АПК України*: тези доп. IV Міжнар. наук.-практ. конф., Тернопіль, 15-16 трав. 2014 р. Тернопіль, 2014. С. 91-94 (здобувач запропонував математичну модель геометричних параметрів насінин пшениці).

12. Кузьминский Р. Д., Соколовский О. Р., **Шеремета Р. Б.** Механічні властивості насінин пшениці при стисканні. *Інтеграційна система освіти, науки і виробництва в сучасному інформаційному просторі*: матеріали III Міжнар. наук.-практ. конф., Тернопіль, 19-20 трав. 2016 р. Тернопіль, 2016. С. 120-122 (здобувач здійснив аналіз механічних властивостей зерен пшениці).

13. Kuzminskyj R., **Sheremeta R.** Improvement of construction of small-sized hammer crusher of grain materials. *Agricultural Machinery*: VI International Scientific Congress Burgas, Bulgaria, 25.06 – 28.06.2018. Burgas, 2018. Vol. 1. P. 83-84 (здобувач запропонував удосконалену конструкцію молоткової дробарки).

14. **Sheremeta R.** Mathematical Models of Geometric Sizes of Seeds as Dependent Random Variables. *International Conference on Agriculture, Technology, Engineering and Sciences*. Lviv, 19 to 21 September 2018. Lviv, 2018. P. 75 (здобувач описав математичну модель геометричних параметрів зерна пшениці як залежних випадкових величин).

15. Kuzminskyj R., **Sheremeta R.** Model of the hammer of small-size crusher of grain materials. *Agricultural Machinery*: VII International Scientific Congress Burgas, Bulgaria, 26.06 – 29.06.2019. Burgas, 2019. P. 48-50 (здобувач запропонував модель молотка для комбінованого методу подрібнення у молотковій дробарці).

***Праці, які додатково відображають наукові результати дисертації******Патенти на корисну модель***

21. Кузьмінський Р. Д., Соколовський О. Р., Шеремета Р. Б. Малогабаритна молоткова дробарка комбінованої дії: пат. 113310 Україна: МПК В02С 13/04 (2006.01). (UA) № U 2016 07011; заявл. 29.06.16; опубл. 25.01.17, Бюл. № 2. 4 с. (здобувач запропонував для інтенсифікації процесу подрібнення в малогабаритній молотковій дробарці додатково встановити нерухомі пластини у вигляду сектора кільця).

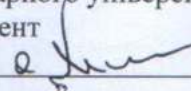
22. Кузьмінський Р. Д., Шеремета Р. Б. Малогабаритна молоткова дробарка комбінованої дії: пат. 121453 Україна: МПК В02С 13/04 (2006.01). № U 2017 05035; заявл. 24.05.17; опубл. 11.12.17, Бюл. № 23. 5 с. (здобувач запропонував змінити форму пластин так, щоб зазор між молотком і пластиною зменшувався в радіальному напрямку від осі обертання ротора до внутрішньої поверхні корпусу).

23. Кузьмінський Р. Д., Шеремета Р. Б. Малогабаритна молоткова дробарка комбінованої дії: пат. 136298 Україна: МПК В02С 13/04 (2006.01). № U 2019 02296; заявл. 06.03.2019; опубл. 12.08.19, Бюл. № 25. 4 с. (здобувач запропонував змінити форму пластин так, щоб зазор між молотком і пластиною зменшувався по дузі в напрямку обертання молотка).

***Патент на винахід***

24. Кузьмінський Р. Д., Шеремета Р. Б. Малогабаритна молоткова дробарка комбінованої дії: пат. 123060 Україна: МПК В02С 13/04 (2006.01). № А 2018 09389; заявл. 17.09.18; опубл. 11.02.21, Бюл. № 6. 4 с. (здобувач запропонував виконати молотки малогабаритної молоткової дробарки комбінованої дії із змінною товщиною, яка збільшується у двох площинах).

## Акти впровадження

«ПОГОДЖЕНО»  
керівник навчального відділу  
Львівського національного  
аграрного університету,  
доцент  
  
О.Я. МИКУЛА  
“\_\_\_\_\_” \_\_\_\_\_ 2020 р.

«ЗАТВЕРДЖУЮ»  
проректор з наукової роботи  
Львівського національного  
аграрного університету,  
в.о. професора  
  
І.Б. ЯЦІВ  
“\_\_\_\_\_” \_\_\_\_\_ 2020 р.



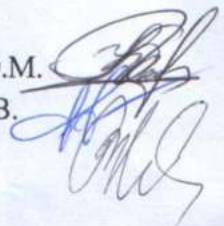
## АКТ

## про впровадження НДР у навчальний процес


Ми, що підписалися нижче, завідувач кафедри сільськогосподарської техніки Львівського національного аграрного університету, к.т.н., доцент Крупич О.М., доценти цієї ж кафедри, к.т.н. Семен Я.В. та к.т.н. Банга В.І. з однієї сторони, а також виконавець НДР, завідувач кабінету навчального кафедри машинобудування, Шеремета Р.Б., з другої сторони, склали цей акт про впровадження результатів закінченої науково-дослідної роботи «Обґрунтування параметрів та режимів роботи малогабаритної зернової дробарки» у навчальний процес Львівського національного аграрного університету для студентів факультету механіки та енергетики, які вивчають дисципліни «Машини, обладнання та їх використання в тваринництві (ОС «Бакалавр)», «Автоматизація виробництва продукції тваринництва» (ОС «Бакалавр), «Проектування технологічних процесів в тваринництві» (ОС «Магістр») впроваджено:

- результати теоретичних та експериментальних випробувань досліджуваної зернової дробарки;
- методика обґрунтування оптимальних параметрів зазору і кута між боковими поверхнями молотка і пластини, для забезпечення процесу подрібнення зерна;
- результати моделювання кількості зерен, що можуть одночасно бути затиснені в зазорі між молотком і пластиною;
- аналітичні залежності питомої енергоємності процесу подрібнення зерна від зазору і кута між боковими поверхнями молотка і пластини;
- результати дослідження геометричних і фізико-механічних властивостей зерна пшениці.

Крупич О.М.  
Семен Я.В.  
Банга В.І.



Шеремета Р.Б.





«Затверджую»

Ректор ЛНАУ

академік НААН України

Снітинський В.В.

«\_\_\_\_\_» 20\_\_ р.



Директор

«Затверджую»

ТзОВ «Аріес Україна»

Анохін Р.І.

«\_\_\_\_\_» 20\_\_ р.

«\_\_\_\_\_»



## АКТ

на передачу результатів досліджень  
малогабаритної зернової дробарки

Ми, що нижче підписалися, склали даний акт про те, що товариству з обмеженою відповідальністю «Аріес Україна» передано результати науково-дослідної роботи, отримані на основі виконаних досліджень згідно плану дисертаційної роботи здобувача **Шеремети Романа Богдановича** стосовно дослідно-конструкторської розробки малогабаритної зернової дробарки з молотками із змінною товщиною робочої зони і додатково встановлених в корпусі нерухомих пластин. За передані розробки, в тому числі, але не виключено у випадку їх практичного застосування /використання ТзОВ «Аріес Україна», Шеремета Р.Б. не має будь-яких претензій на фінансову чи будь-яку іншу компенсацію.

Представники ЛНАУ:

завідувач кафедри ЕТСТМ

ім.проф. Семковича О.Д.

докт. техн. наук, доцент

Кузьмінський Р.Д.

Представник ТзОВ «Аріес Україна»»

Завідувач виробництвом

Кавф Я.Р.

завідувач кабінету навчального

кафедри машинобудування

Шеремета Р.Б.

«Затверджую»

Ректор ЛНАУ

академік НААН України

Світинський В.В.

2021 р.



«Затверджую»

Директор ТОВ

«Крупецький комбікормовий завод»

Варфалюк С.В.

2021 р.



## АКТ

**На передачу результатів теоретичних та експериментальних досліджень зернової дробарки комбінованої дії**

Ми, що нижче підписалися, склали цей акт який засвідчує передачу «Рекомендацій по впровадженню у виробництво результатів теоретичних та експериментальних досліджень зернової дробарки комбінованої дії» отриманих на основі проведених наукових досліджень згідно плану дисертаційної роботи здобувача **Шеремети Романа Богдановича** (науковий керівник докт. техн. наук, доц. Кузьмінський Р.Д.)

«Рекомендації по впровадженню у виробництво результатів теоретичних та експериментальних досліджень зернової дробарки комбінованої дії» містять основні теоретичні положення процесу подрібнення, що базується на комбінованому способі руйнування зерна за рахунок ударної та перетиральної дії та вихідні вимоги для проведення дослідно-конструкторської розробки зернової дробарки комбінованої дії.

Представники ЛНАУ:

завідувач кафедри ЕТСТМ  
ім.проф. Семковича О.Д.  
докт. техн. наук, доцент  
**Кузьмінський Р.Д.**

завідуючий комп'ютерним кабінетом  
кафедри машинобудування

**Шеремета Р.Б.**
Представник:

**ТОВ «Крупецький комбікормовий завод»**

завідуючий виробництвом

**Загоруйко М.К.**