МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ

ТЕРНОПІЛЬСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ імені ІВАНА ПУЛЮЯ

Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису

ФЕДЧЕНКО ЗОЯ АНАТОЛІЇВНА

УДК 631.363.2

ДИСЕРТАЦІЯ

ОБГРУНТУВАННЯ ПАРАМЕТРІВ СЕПАРУЮЧИХ РЕШІТ МОЛОТКОВИХ ЗЕРНОВИХ ДРОБАРОК

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

З. А. Федченко

Науковий керівник — Бойко Анатолій Іванович, доктор технічних наук, професор

Тернопіль - 2017

АНОТАЦІЯ

Федченко З. А. **Обгрунтування параметрів сепаруючих решіт молоткових зернових дробарок.** – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук (доктора філософії) за спеціальністю 05.05.11 «Машини і засоби механізації сільськогосподарського виробництва». – Тернопільський національний технічний університеті імені Івана Пулюя, Тернопіль, 2017.

У дисертації розглянуто основні марки машин, конструкція яких передбачає встановлення класифікаторів вихідного продукту у вигляді сепаруючих решіт. Проаналізовано умови експлуатації решіт, описано причини виникнення відмов, а також розглянуті перспективи розвитку запропонованих конструктивних рішень сепаруючих робочих органів. Однак,усі раніше проведені удосконалення в основному направлені на підвищення продуктивності і якості виконання процесу сепарації, в той час як підвищенню довговічності решіт приділено недостатньо уваги.

Дослідження дисертаційної роботи, спрямовані на збільшення терміну експлуатації сепаруючих робочих органів, за рахунок внесення конструктивних змін у форму отворів решіт та своєчасного їх перевертання (реверсу) на нову робочу сторону. Розглянуто нерівномірність зношування отворів і розроблено математичну модель процесу втрати форми робочої поверхні серійних та експериментальних сепаруючих решіт.

Для узагальнення картини зміни форми отворів і виявлення тенденцій їх утворення під дією потоку зернової маси вперше розроблена математична модель зношування отворів решіт. Пропонується величину зношування отворів оцінювати втратою площі тіла, що утворюється між двома суміжними профілями отвору за однакові проміжки наробітку. Визначення загальної величини зношування це складування величин зношених площадок, що розглядається як накопичувальний процес втрати матеріалу і

форми отворів. Побудовані рівності величин площ зношування показують рівносповільнений характер переміщення профілів, який виявляє тенденцію до формування отворів природного зношування.

Проведеними теоретичними дослідженнями встановлено основні закономірності зміни форми отворів серійних решіт при їх зношуванні. Виявлені параметри граничного зношування та доцільність своєчасного перевертання решіт на менш зношену сторону для підвищення їх загальної довговічності. Використання своєчасного перевертання відкриває можливість підвищити довговічність решіт до максимально можливого, що дозволяє збільшити їх загальний ресурс.

Для підвищення довговічності решіт, надавати їм початкову конструктивну геометрію близьку до форми природного зношування. Очевидно такою формою може бути та, що утворюється при завершені експлуатації звичайного серійного решета, коли швидкість переміщення профілю прямує до мінімального свого значення.

Аналітичними дослідженнями встановлено основні параметри процесу зношування решіт з отворами тороїдальної форми. Враховуючи нерівномірність розподілу інтенсивності зношування отворів, обґрунтовано доцільність їх перевертання для збільшення терміну експлуатації.

Для оцінки зміни форми отворів сепаруючих решіт при їх зношуванні розроблений метод зняття відбитків (реплік) з досліджуваних ділянок з наступною оцінкою площі зношування. Закріплення відбиткового матеріалу на ділянках, що досліджується здійснюється за допомогою розробленого фіксатора, робоча частина якого копіює поверхневу форму отворів сепаруючого решета.

Проведеними експериментальними дослідженнями встановлено, що на початку експлуатації решіт форма отворів серійних решіт досить швидко змінюється, набуваючи округлого профілю з максимальними втратами товщини шару матеріалу. Утворений округлий профіль зберігає свій

загальний характер формування протягом усього терміну експлуатації решета.

Аналізом отриманих профілів зношування отворів у перерізі, при різних наробітках дробарки встановлено, що величина зносу за сторонами відрізняються між собою. Причиною цього є різниця в кутах атаки поверхні решета частинками зерна, які визначаються напрямом руху матеріалу у подрібнювальній камері. Нерівномірність зношування отворів дає підстави для застосування конструктивного методу підвищення довговічності решета шляхом його перевертання на нову робочу сторону для продовження експлуатації та відпрацювання повного закладеного ресурсу. Застосування даної операції після наробітку 400 т, дає змогу збільшити загальний наробіток серійного решета зернодробарки у 0,33 рази.

Важливою характеристикою, що відображає специфічні особливості формування поверхонь при зношуванні, є визначення площ зношених ділянок, які знаходяться між двома утвореними профілями зношування. Отримані результати показують, що для кожної із сторін за рівні проміжки наробітку площі зношених ділянки одинакові. Це пояснюється стабільністю протікання процесу зношування на будь-якому етапі експлуатації решета і підкреслює те, що робота, яка витрачається на зношування є величиною постійною.

На підставі проведених досліджень зносу серійних сепаруючих решіт, із врахуванням теоретичних передумов, розроблено експериментальне решето, форма отворів якого виконана по вгнутій поверхні, наближеної до форми їх природного зношування. Експлуатація експериментального решета відбувається за тими ж параметра, що і для серійного, а дослідження зміни форми отворів проводяться шляхом зняття відбитків з робочої поверхні у різних стадіях їх зношування. Характерною особливістю утворення робочих профілів експериментальних решіт є те, що вони мало змінюють свою початкову геометрію протягом всього терміну експлуатації. Наробіток до зношування складає 1080 т подрібненого зерна відносно серійного 600 т.

Результати зносу отворів експериментальних решіт у перерізі показують на нерівномірність втрати форми отворів за сторонами розглядаючи їх у перерізі. З метою підвищення довговічності та відпрацювання повного ресурсу решета,проводимо його переворот на 180° (реверс)після наробітку дробарки в 750 т. Застосування даної операції дозволяє збільшити загальний наробіток решета з отворами тороїдальної форми до 1470 т переробленої сировини.

Таким чином, сумісне використання конструктивних методів для підвищення довговічності сепаруючих решіт, що пов’язані з їх реверсним перевертанням і зміною форми отворів із циліндричної на тороїдальну, приводить до загального підвищення наробітку решета на 75%, без втрати функціональних можливостей решета.

Ключові слова: решето, інтенсивність зношування, оптимізація сторін, наробіток до відмови, форма природного зношування, отвори тороїдальної форми.

ANNOTATION

Fedchenko Z. A. Rationalization parameters of the separating sieves in grain crushers. - Qualifying scientific work on the rights of manuscripts.

Thesis for a candidate degree in specialty 05.05.11 «Machines and mechanization of agricultural production». – Ternopol national technical university named after Ivana Pulyuj, Ternopol, 2017.

The dissertation deals with the main marks of machines, the design of which involves the establishment of classifiers of the original product in the form of separating grids. The operating conditions of the lattices are analyzed, the causes of failure are described, as well as the prospects of development of the proposed constructive solutions of separating working bodies are considered. However, all previous improvements are mainly aimed at increasing the productivity and quality

of the separation process, while increasing the longevity of the grid is not enough attention.

Researches of dissertation work, aimed at increasing the life of separating working bodies, due to the introduction of structural changes in the shape of openings of the lattice and their timely reversal (reverse) to the new working side. The uneven wear of the holes is considered and the mathematical model of the process of loss of the working surface of the serial and experimental separating grids is developed.

For the generalization of the pictures of the changes in the shape of the holes and the identification of the trends in their formation under the influence of the grain mass flow, the mathematical model of wear of the openings of the lattices was developed for the first time. It is proposed to estimate the amount of wear of holes to estimate the loss of body area formed between two adjacent holes profiles at the same time intervals. Determination of the total value of wear is the storage of the values of worn out sites, which is considered as a cumulative process of material loss and the shape of the holes. The constructed equations of the sizes of areas of wear show the slow-moving nature of the displacement of the profiles, which tends to form the holes of natural wear.

Conducted theoretical studies established the basic laws of changing the shape of the holes of serial lattices in their wear. The parameters of limiting wear and expediency of timely turning of the grids to the less worn out side are revealed for increasing their overall durability. Using timely inverting opens up the opportunity to improve the durability of the grid to the maximum possible, which allows you to increase their total resource.

To increase the longevity of the lattices, give them an initial structural geometry close to the form of natural wear. Apparently this form may be the one formed when the normal serial sieve is completed, when the speed of the profile moves to its minimum value.

Analytical studies have established the main parameters of the process of wearing out the grids with holes of toroidal shape. Taking into account the uneven

distribution of the intensity of wear of the holes, the expediency of their overturning has been substantiated to increase the life of the exploitation.

In the order to assess the change in the shape of the openings of the separating grids, when they were worn, a method for removing the marks (replicas) from the investigated areas was developed, with the subsequent estimation of the wearing area. Fixing of the reflective material on the studied areas is carried out with the help of the developed lock, the working part of which copies the superficial shape of the openings of the separating sieve.

The experimental research carried out has found that at the beginning of the operation of the lattice the shape of the holes of the serial lattices changes very rapidly, obtaining a rounded profile with maximum losses of the thickness of the material layer. The created round profile retains its own the general nature of the formation throughout the life of the sieve.

Analysis of the received profiles of wear of openings in the section, with different workings of the crusher, it is established that the amount of wear on the sides differ from each other. The reason for this is the difference in the angle of attack of the surface of the sieve by grain particles, which are determined by the direction of movement of the material in the chamber. The uneven wear of the holes provides the basis for applying a constructive method for increasing the longevity of the sieve by turning it over to a new working side for the continuation of exploitation and the development of a complete built-in resource. The application of this operation after the work of 400 tons, makes it possible to increase the total work of the serial grain sieve in 0,33 times.

An important characteristic that reflects the specific features of the formation of surfaces in wear, is the determination of areas of worn out areas that are located between the two formed profiles of wear. The obtained results show that for each side at equal intervals, the area of the worn area is the same. This is due to the stability of the process of wear on any stage of the operation of the sieve and emphasizes that the work spent on wear is a constant value.

On the basis of conducted research on the demolition of serial separating grates, taking into account the theoretical preconditions, an experimental sieve has been developed, the shape of which holes is made on an engrossed surface, close to the shape of their natural wear. The operation of the experimental sieve is carried out according to the same parameter as for the serial, and the study of the change in the shape of the holes is carried out by removing the prints from the working surface in different stages of their wear. A characteristic feature of the formation of working profiles of experimental lattices is that they do little to change their initial geometry throughout the lifetime. The work to wear is 1080 tons of crushed grain in relation to the serial production of 600 tons.

The results of the wear of the openings of the experimental lattices in the section indicate the unevenness of the loss of the shape of the holes by the sides viewing them in the section. In order to increase the durability and working out the full life of the sieve, we make its revolution by 180 ° (reverse) after the crusher is 750 tons. Application of this operation allows increasing the total work of the sieve with toroidal holes to 1470 tons of recycled raw material.

Thus, the combined use of constructive methods for increasing the longevity of separating grates associated with their reversal turning and change in the shape of holes from a cylindrical to toroidal leads to a total increase in the sieve usage by 75%, without losing the functionality of the sieve.

Keywords: sieve, intensity of wear, optimization of sides, work-up to failure, form of natural wear, openings of toroidal form.

Список публікацій здобувача

Статті у наукових фахових виданнях України:

1. Бойко А. І., Морозовська З. А. (Федченко З. А.). Стан проблеми і шляхи підвищення довговічності решіт дробарок. *Вісник Житомирського національного агротехнічного університету.* Житомир: ЖНАЕУ, 2014. Вип. № 2 (45), Т. 4, Ч. 1. С. 153 – 157. *(Здобувач проаналізувала*

запропоновані шляхи підвищення довговічності решіт зернодробарок і дослідила процес втрати форми отворів в процесі експлуатації).

2. Бойко А. І., Новицький А. В., Морозовська З. А. (Федченко З. А.). Аналіз конструктивних рішень решіт зернодробарок, направлених на підвищення їх довговічності. *Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України*. К.: НУБіП Украни, 2014. Вип. 196, Ч. 2. С. 212 – 215. *(Здобувач проаналізувала всі запропоновані конструктивні рішення, які були направлені на підвищення довговічності решіт).*

3. Бойко А. І., Морозовська З. А. (Федченко З. А.). Математичне моделювання зношування елементарної дільниці отворів решіт. *Технічний сервіс агропромислового, лісового та транспортного комплексів*. Харків, 2016. № 6. С. 138 – 146. *(Здобувач описала математичну модель зношування отворів серійних сепаруючих решіт).*

4. Бойко А. І., Федченко З. А. Дослідження динаміки зміни форми отворів серійних сепаруючих решіт. *Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка «Технічні системи і технології тваринництва» «Технічний сервіс машин для рослинництва»*. Харків, 2017. Вип. 181. С. 37 – 43. *(Здобувач описала динаміку зміни форми отворів серійних сепаруючих решіт).*

5. Бойко А. І., Морозовська З. А. (Федченко З. А.). Експериментальні дослідження динаміки зміни форми отворів сепаруючого решета зернодробарок. *Загальнодержавний міжвідомчий науково-технічний збірник «Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин»*. Кіровоград: КНТУ, 2015. Випуск 45, Ч. ІІ. С. 3 – 7. *(Здобувач дослідила процес втрати форми отворів серійних сепаруючих решіт).*

Статті у наукових фахових виданнях України,
включених до міжнародної наукометричної бази даних:

6. Бойко А. І., Морозовська З. А. (Федченко З. А.). Обґрунтування нової форми отворів сепаруючих решіт. *Вісник Сумського національного аграрного університету. Серія: механізація та автоматизація виробничих процесів*. Суми, 2016. Вип. 10/2 (30). С. 111 – 114. *(Здобувачем обґрунтовано нову форму отворів сепаруючих решіт зернодробарок для підвищення їх надійності).*

7. Boyko A. I., Fedchenko Z. A. Analysis of work conditions and causes wear holes separating sieves in service. Збірник наукових праць. Серія: Галузеве машинобудування, будівництво. Полтава, 2017. Вип. 1 (48). С. 34 – 40. *(Здобувачем обґрунтовано особливості зношування решіт з отворами тороїдальної форми).*

Статті у науковому виданні іншої держави:

8. Бойко А. И., Морозовская З. А. (Федченко З. А.). Конструктивный метод повышения долговечности сепарирующих решет зернодробилок. *Научные труды SWorld*. Иваново: Научный мир, 2015. Выпуск 2(39). Том 6. С. 82 – 85. *(Здобувач запропонувала новий підхід зміни форми отворів сепаруючих решіт для збільшення можливого ресурсу роботи).*

9. Бойко А. І., Морозовська З. А. (Федченко З. А.). Оптимізація ресурсу серійного решета при його реверсному використанні. *Научные труды SWorld*. Иваново: Научный мир, 2016. Выпуск 2(43). Том 1. С. 84 – 89. *(Здобувач пропонує додатковий спосіб збільшення довговічності решіт за рахунок перевертання).*

Патент на корисну модель:

10. Патент на корисну модель 96341 України, МПК, B02C 13/284. Решітна дробарка / А. І. Бойко, З. А. Морозовська (З. А. Федченко); заявник і патентовласник Бойко Анатолій Іванович, Морозовська Зоя Анатоліївна.

№ u201410222; заявл. 18.09.2014; опубл. 26.01.2015, Бюл. №2. *(Здобувач обґрунтувала застосування сепаруючих решіт з отворами тороїдольної форми).*

Тези наукових доповідей:

11. Новицький А. В., Морозовська З. А. (Федченко З. А.), Бездушний П. М., Харьковський І. С. Проблема забезпечення надійності кормоприготувальних машин. *Перспективи та тенденції розвитку конструкції сільськогосподарських машин та знарядь: І Всеукраїнська науково-практична конференція студентів та молодих науковців*. м. Житомир,
16-17 жовтня 2014 р.: тези доповідей. Житомир, 2014. С. 46. *(Здобувач представила етапи послідовної оцінки рівня надійності існуючих систем).*

12. Морозовська З. А. (Федченко З. А.) Зношування і зміни форми отворів сепаруючих решіт молоткових дробарок. *ІІ Міжнародна науково-технічна конференція «Крамаровські читання»*. м. Київ, 17-18 лютого 2015 р.: тези доповідей Національний університет біоресурсів і природокористування України. Київ, 2015. С. 121 – 122.

13. Морозовська З. А. (Федченко З. А.). Конструктивні методи підвищення довговічності решітних зернодробарок. *ІІ Міжнародна наукова конференція «Інноваційний розвиток аграрної сфери»*. м. Київ, 19-21 березня 2015 р.: тези доповідей Національний університет біоресурсів і природокористування України. Київ, 2015. С. 43 – 44.

14. Морозовська З. А. (Федченко З. А.). Визначення зносу сепаруючих робочих органів без руйнування. *Сучасні проблеми землеробської механіки: XVI Міжнародна наукова конференція*, 17-19 жовтня 2015 р.: тези доповідей / Національний університет біоресурсів і природокористування України. Київ, 2015. С. 130.

15. Бойко А. И., Морозовська**я** З. А. (Федченко З. А.). Некоторые конструктивные решения направленные на повышение эффективности

работы молотковых зернодробилок. *Молодежный форум: технические и математические науки: Международная научно-практическая конференція*. г. Воронеж, 9-12 ноября 2015 г.: Сборник научных трудов / Воронежский государственный лесотехнический університет шимени Г. Ф. Морозова. Воронеж, 2015. №7. Ч. 1 (18-1). С. 170 – 173. *(Здобувач обґрунтувала деякі конструктивні методи удосконалення сепаруючих решіт для покращення роботи зернодробарок).*

16. Морозовська З. А. (Федченко З. А.). Основні фактори, що впливають на процес зміни форми отворів сепаруючих решіт зернодробарок. *Сучасні технології виробництва зернових культур 2016: Міжнародна науково-практична конференція в рамках VI Міжнародної виставки інноваційних рішень у зерновому господарстві «Зернові технології 2016»*. м. Київ, 12 лютого 2016 р.: тези доповідей Національний університет біоресурсів і природокористування України. Київ, 2016. С. 79 – 80.

17. Бойко А. І., Морозовська З. А. (Федченко З. А.). Забезпечення працездатності машин для приготування та роздавання кормів. *Інноваційні розробки студентів та молодих науковців в галузі технічного сервісу машин: Всеукраїнська науково-практична інтернет-конференція*. м. Харків, 1-2 грудня 2016 р.: тези доповідей / Харківський національний технічний університет сільського господарства імені Петра Василенка. Харків, 2017. С. 30. *(Здобувач обґрунтувала деякі конструктивні методи удосконалення сепаруючих решіт).*

ЗМІСТ

АНОТАЦІЯ…… 2
ЗМІСТ…….. 13
ВСТУП……..…….…… 16
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ КОНСТРУКТИВНИХ ОСОБЛИВОСТЕЙ, УМОВ ЕКСПЛУАТАЦІЇ І ВИДІВ ВІДМОВ СЕПАРУЮЧИХ РЕШІТ ……... 21
1.1 Фізико-механічні властивості зернового матеріалу, що подрібнюється і зношує деталі дробарок…….. 22
1.2 Аналіз конструкцій машин для подрібнення та сепарації зернової маси……..……. 28
1.3 Огляд та аналіз особливостей конструктивних рішень сепаруючих робочих органів…… 35
1.4 Аналіз пошкоджень робочих органів подрібнювачів та причини виникнення відмов…… 38
1.5 Напрями робіт по підвищенню довговічності сепаруючих решіт…….. 43
1.6 Принцип застосування природного зношування деталей машин для підвищення їх довговічності……. 51
Постановка задач та обґрунтування напрямків дослідження……. 54
РОЗДІЛ 2. ТЕОРІЯ ЗНОШУВАННЯ І ЗМІНИ ФОРМИ ОТВОРІВ СЕПАРУЮЧИХ РЕШІТ…… 56
2.1 Особливості умов експлуатації і зношування отворів сепаруючих решіт…… 56
2.2 Математичне моделювання зношування елементарної ділянки отворів серійного решета…… 58
2.3 Накопичувальний процес зношування отворів…… 72
2.4 Оптимізація ресурсу серійного решета при його реверсному використанні……. 76

2.5 Обґрунтування нової форми отворів сепаруючих решіт…… 83
Висновки по другому розділу…… 89
РОЗДІЛ 3. ПРОГРАМА І МЕТОДИКА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ……. 92
3.1 Програма експериментальних досліджень…….. 92
3.2 Розробка інструменту для виготовлення експериментальних сепаруючих решіт та обладнання для проведення експериментів…….…… 93
3.3 Методика зняття відбитків поверхні сепаруючих решіт …..…. 95
3.4 Методика дослідження динаміки зміни форми отворів робочої поверхні сепаруючих решіт…… 98
3.5 Обладнання для перевірки вологості зернового матеріалу……. 102
3.6 Методика визначення якості помелу зерна при використанні серійних та експериментальних решіт…….. 104
3.7 Методика топографічних досліджень зношеної поверхні сепаруючих решіт…… 105
3.8 Металографічний аналіз структурних змін матеріалу сепаруючих решіт…… 106
РОЗДІЛ 4. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ДИНАМІКИ ЗМІНИ ФОРМИ ОТВОРІВ СЕРІЙНИХ ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ СЕПАРУЮЧИХ РЕШІТ ……. 108
4.1 Аналіз умов роботи та причини зношування отворів сепаруючих решіт в процесі експлуатації……..……. 108
4.2 Дослідження стану поверхні зношених сепаруючих решіт….. 110
4.3 Дослідження динаміки зміни форми отворів серійних сепаруючих решіт…….. 112
4.4 Збільшення можливого ресурсу роботи серійних сепаруючих решіт…….. 118

4.5 Динаміка зміни форми отворів експериментальних сепаруючих решіт…….. 122

4.6 Збільшення можливого ресурсу роботи експериментальних сепаруючих решіт…….. 127

4.7 Визначення якості подрібнення зерна дослідними сепаруючими решетами…….. 131

4.8 Структура поверхневих шарів металу решіт в процесі експлуатації…… 135

Висновки по четвертому розділу……. 138

РОЗДІЛ 5. ЕКОНОМІЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ ВПРОВАДЖЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕНЬ…… 139

5.1 Ефективність впровадження результатів досліджень …… 139

5.2 Розрахунок економічної ефективності застосування результатів дослідження……. 141

Висновки за розділом …… 143

ВИСНОВКИ…….. 144

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ……..……..... 146

ДОДАТКИ ……..…..…. 163

ВСТУП

Актуальність теми. Розвиток тваринництва в Україні передбачає впровадження інноваційних технологій приготування комбікормів з підвищенням ефективності їх використання.

На сьогодні основним обладнанням для подрібнення зернового матеріалу є молоткові дробарки ударної дії. Головними сепаруючими елементами в цих машинах, що відповідають за якість вихідного матеріалу, як правило, є решета. Саме за допомогою решіт регулюється крупність помолу – основний показник ступеню подрібнення зернових матеріалів, а значить і можливостей споживання їх тваринам.

В процесі експлуатації сепаруючі робочі органи інтенсивно зношуються поступово втрачаючи свою працездатність. Це приводить до зниження ефективності їх використання.

Проблема забезпечення необхідного рівня довговічності решіт представляє певні науково-технічні труднощі пов’язані з особливістю перфорованої різноорієнтованою робочою поверхнею самих решіт, а також з багатофакторністю умов експлуатації.

Нові перспективи у вирішенні проблеми підвищення довговічності сепаруючих решіт відкривають конструктивні методи пошуку форм елементів деталей, що мають мінімально можливу інтенсивність зношування. Це робить проведення досліджень у даному напрямку своєчасними і актуальним.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.

Наукові дослідження пов’язані з науково-дослідною роботою Національного університету біоресурсів і природокористування України за темою «Підвищення рівня надійності і конкурентноспроможності складної сільськогосподарської техніки», (номер державної реєстрації 0110U002869); «Обґрунтувати параметри технічного стану сільськогосподарської техніки і

режими функціонування систем ремонтно-технологічного забезпечення і технічного обслуговування» (№ державної реєстрації 0113U007633).

Мета і задачі дослідження. Мета дослідження – підвищення довговічності сепаруючих робочих органів зернодробарок конструктивним методом.

Відповідно до поставленої мети сформульовані наступні *завдання дослідження:*

- проаналізувати існуючі конструктивні рішення сепаруючих робочих органів решітних кормодробарок, умови і особливості їх експлуатації;
- виявити причини втрати працездатності решітних сепараторів і визначити шляхи підвищення їх довговічності;
- встановити основні закономірності зміни форми отворів при їх зношуванні; виявити граничні значення і раціональні параметри їх величин для використання конструктивних методів підвищення довговічності;
- обґрунтувати парметри решіт мінімальної інтенсивності зношування; довести необхідність введення нової форми отворів решіт для досягнення їх максимальної довговічності;
- оцінити техніко-економічну ефективність впровадження результатів досліджень.

Об'єкт дослідження – процеси зношування і динаміка зміни параметрів отворів сепаруючих робочих органів зернодробарок.

Предмет дослідження – встановлення закономірностей втрати працездатності сепаруючих робочих органів.

Методи дослідження. Дослідження процесу зміни форми отворів сепаруючих решіт проводяться з використанням основних положень аналітичної і диференціальної геометрії, методів диференціального і інтегрального числень. Використано основні положення кінематики нерівномірного руху. Результати експериментальних досліджень оброблено методами статистичного аналізу. Вивчення топографії поверхонь тертя і

металографії металу решіт виконано із застосуванням оптичного обладнання. Для оцінки зношування і зміни форми отворів решіт використано метод реплік з наступною оцінкою площі зношування.

Наукова новизна отриманих результатів. Основні положення дисертаційної роботи визначають наступну наукову новизну отриманих результатів:

- вперше на основі математичної моделі описано процес зношування і зміни форми отворів сепаруючого решета. Встановлено граничне значення зношування, яке визначає наробіток до відмови;
- на рівні новизни, за результатами аналізу особливостей динаміки зношування отворів запропоновано тороїдальну конструктивну їх форму, яка сприяє зниженню інтенсивності зношування і підвищує довговічність;
- набув подальший розвиток конструктивний спосіб підвищення довговічності решіт шляхом своєчасного їх перевертання на нову робочу сторону (реверсу). Вирішена задача оптимізації напрацювання сторін отворів і виявлені параметри перевертання решіт для досягнення максимальної їх довговічності;
- вперше встановлені закономірності розподілу величин зношування визначених за нормалями до профілів отворів. На підставі цього встановлено затухаючий характер зміни форм профілів з поступовим переходом їх до форми природного зношування.

Практичне значення отриманих результатів полягає у:

- обґрунтуванні тороїдальної форми отворів решіт, близької до форми природного їх зношування;
- встановлені оптимального періоду роботи решіт до їх перевертання (реверсу) для отримання максимального напрацювання до повного зношування;
- підвищенні довговічності сепаруючих решіт на 75%.

Результати досліджень впроваджені до виробництва у приватному акціонерному товаристві «Харківпродмаш» (м. Харків, Україна).

Особистий внесок здобувача. Основні теоретичні й експериментальні дослідження за темою дисертаційної роботи виконані здобувачем особисто, зокрема: обґрунтовано актуальність проведення досліджень та проаналізовано зміст публікацій та патентної документації за обраною темою [2, 16]; проведено теоретичні дослідження формування профілів зношування отворів сепаруючих решіт [3]; обґрунтовано накопичувальний процес зношування серійних сепаруючих решіт [5]; запропоновано збільшити ресурс решіт за рахунок їх перевертання (реверсу) [8]; запропоновано конструкцію нового сепаруючого решета з отворами тороїдальної форми [6, 10]; розроблено методику та проведено експериментальні дослідження [12]; вивчено динаміку зміни форм отворів серійних сепаруючих решіт та решіт з отворами тороїдальної форми та їх граничний знос [4, 9, 14]; проведено аналіз результатів експериментальних досліджень; визначено прогнозовану техніко-економічну оцінку ефективності впровадження результатів роботи.

У спільних наукових публікаціях здобувачем наведено, за згодою співавторів, лише власну частину результатів.

Апробація результатів дисертації. Основні положення дисертаційної роботи доповідались на щорічних науково-технічних конференціях науково-педагогічних працівників та аспірантів, що проводилися у Національному університеті біоресурсів і природокористування України впродовж 2013-2016 р; XV-й Міжнародній науковій конференції «Сучасні проблеми землеробської механіки» (Житомир, 16-18 жовтня 2014р.); III-й Міжнародній науковій конференції «Інноваційний розвиток аграрної сфери» в рамках роботи 15-ї Міжнародної спеціалізованої виставки-ярмарки «Україна аграрна 2015» (Київ, 19-21 березня 2015 р.); Міжнародній науково-практичній конференцій «Молодежный форум: технические и математические науки» (Вороніж, 9–12 листопада 2015 р.); Міжнародній науково-практичній конференції «Сучасні технології виробництва зернових культур 2016» в рамках VI Міжнародної виставки інноваційних рішень у зерновому господарстві «Зернові технології 2016» (Київ, 15-17 лютого 2016 р.);

Міжнародній науково-практичній конференції «Технічне забезпечення виробництва органічної продукції та біопалива в АПК» в ході проведення XXVIII Міжнародної агропромислової виставки «АГРО-2016» (Київ, 10 червня 2016 р.); Всеукраїнській науково-практичній інтернет-конференції «Інноваційні розробки студентів та молодих науковців в галузі технічного сервісу машин» (Харків, 1-2 грудня 2016 р.); Міжнародній науково-практичній конференції «Технічний прогрес в АПК» (Харків, 23-24 березня 2017 р.); ІІІ Всеукраїнська науково-практична конференція «Перспективи і тенденції розвитку конструкцій та технічного сервісу сільськогосподарських машин і знарядь» (м. Житомир, 29-30 березня 2017 р.).

Публікації. Основні положення дисертаційної роботи опубліковано в 17 друкованих працях, з яких 4 статті у наукових фахових виданнях України, 2 статті у наукових фахових виданнях України, включених до міжнародної наукометричної бази даних, 2 статті у наукових виданнях інших держав; патент України на корисну модель та 7 тез доповідей.

Структура і обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається із вступу, п’яти розділів, загальних висновків, списку використаних джерел, що містить 159 найменувань. Матеріали викладені на 165 аркушах комп’ютерного тексту, містить 7 таблиць та 61 рисунок, додатки.

РОЗДІЛ 1
АНАЛІЗ КОНСТРУКТИВНИХ ОСОБЛИВОСТЕЙ, УМОВ ЕКСПЛУАТАЦІЇ І ВИДІВ ВІДМОВ СЕПАРУЮЧИХ РЕШІТ

Одним з найважливіших завдань забезпечення високої продуктивності у тваринництві є не лише заготівля високоякісних кормів, а й правильне їх приготування. Головне завдання комбікормового виробництва полягає у забезпеченні поживними речовинами всіх видів і вікових груп тварин повноцінними, збалансованими кормами. Якість кормів закладає основу для підвищення продуктивності тварин та їх стійкості до різних хвороб.

Повноцінність та збалансованість кормів залежить не тільки від необхідного складу компонентів, а також від технології приготування на спеціальному обладнанні. Із усіх машин, які використовуються для подрібнення та приготування концентрованих кормів, найбільшого розповсюдження набули молоткові дробарки. Вони мають високу продуктивність і дозволяють швидко переробляти необхідну кількість сировини, яку відразу ж можна використовувати в якості компонентів корму.

Подрібнювачі сировини рослинного походження використовуються в дев’яноста процентах всіх технологічних ліній з приготування збалансованих кормів тваринницьких господарств. Вони найкраще задовольняють якість вихідного продукту при подрібненні і складають самостійну групу високошвидкісних машин ударної дії. Простота їх конструкцій, зручність у застосуванні, малі габаритні розміри, безпечність в обслуговуванні, висока пропускна здатність, а також оснащеність засобами автоматичного контролю – є основними перевагами цих машин.

Сьогодні ринок України налічує більше 200 видів подрібнювачів, які застосовуються на спеціалізованих підприємствах, а також в особистих, підсобних та фермерських господарствах для подрібнення різних видів зернових: пшениці, жита, ячменю, кукурудзи, а також насіння деяких бобових і олійних культур.

Дослідженню технологічного процесу подрібнення зернового матеріалу, та питанням конструктивних розробок і удосконаленням молоткових подрібнювачів присвячена значна кількість наукових праць [1-10]. При цьому основи методичного забезпечення експериментальних досліджень подрібнювачів кормів здійснили як українські вчені, так і науковці інших країн.

В напрямку підвищення надійності та ефективності використання зерноподрібнювачів відомі праці провідних науковців: Кальбуса Г. Л., Бойка А. І., Пилипенко О. М., Тимоновського А. В., Сідашенко О. І., Моєсєєва О. О., Новицького А. В. [11-16] та багатьох інших.

Питаннями механізації подрібнення зерна займались Мельникова С. В., Ревенко І. І., Гернета М. М., Рожківський М. Ф., Кирпічников Ф. С., Зайцев А. Н. [9, 17-20] та інші, які запропонували ряд удосконалених зернодробарок, що використовуються в сільському господарстві.

Аналіз літературних джерел показав, що в основному, усі проведені дослідження та удосконалення подрібнювачів проводились з метою зниження енергозатрат, підвищення продуктивності, і забезпечення зносостійкості робочих органів, а також покращення якості (рівномірності) помелу, механізації завантажувальних і вивантажувальних робіт. Проте відсутність достатнього аналізу процесу просіювання подрібненого зернового матеріалу сепаруючими робочими органами та зношування решіт в процесі експлуатації спрямовують на необхідність продовження досліджень в цьому напрямку.

1.1. Фізико-механічні властивості зернового матеріалу, що подрібнюється і зношує деталі дробарок

Дослідженнями фізико-механічних властивостей зернового матеріалу займалися Крагельский І. В., Мельников С. В., Бойко А. І., Куприц Я. Н.,

Афанасьєв П. А, Ялпачик Ф. Ю., Бутковский В. А., Соломка О. В., Демидов А. Р., Тарутін П. П. та інші [21-28].

Властивості зернових матеріалів в процесі зберігання сільськогосподарської продукції можуть змінюватися в широких межах, в залежності від ряду чинників (культури, сорту, вологості і т.д.). Важливим показником, що впливає на енергоємність процесу та якість подрібнення є вологість зернового матеріалу, яка повинна знаходитися згідно Держспоживстандарту України [29] в допустимих межах 12-14%.

При визначенні енергетичних і якісних показників процесу подрібнення необхідно враховувати характерні особливості кожного з видів матеріалу і його фактичний стан. Аналіз досліджень, проведених раніше [30-31], дає змогу систематизувати середні значення основних параметрів зернових матеріалів, які використовуються для приготування комбікормів.

Основні фізико-механічні характеристики приведені в таблиці 1.1.

Таблиця 1.1

Фізико-механічні характеристики зернових матеріалів, що подрібнюються при приготуванні кормових сумішей з вологістю 12-14%

Культура	Коефіцієнт відновлення	Мікротвердість, *МПа*		Зусилля руйнування, *Н*	Маса зерна, на 100 г
		оболонка	ендосперма		
Пшениця	0,8-0,4	35-45	155-175	120-280	20 - 40
Овес	0,82-0,6	22-25	120-140	100-120	20 - 42
Ячмінь	0,7-0,62	370-580	120-150	120-180	31 - 51
Кукурудза	0,7-0,34	30-200	50-350	180-220	280-290
Горох	0,77-0,4	20-65	48-105	80-100	130-140

Приведені фізико-механічні характеристики зернових матеріалів відображують, в певній мірі, фізичний стан і геометричні параметри частинок, що утворюють сам матеріал у своїй масі. Однак слід зауважити, що виявлені характеристики скоріше є параметрами стану поверхонь і розмірів частинок, що безумовно відіграє важливу роль при вивченні утримання і переміщення їх при взаємодії з елементами робочих органів машини. Проте ці характеристики зернового матеріалу мають не велике відношення до зношувальної здатності робочих органів подрібнювачів. Принаймні потрібно врахувати два фактори, які впливають на зношування деталей подрібнювальної камери зерном.

По-перше зернова частинка взаємодіє з поверхнею робочого органу імпульсно при ударі. Імпульсне локальне навантаження при відносно великій швидкості удару створює на поверхні збільшені контактні напруження, а властивості зернини, дещо змінюються порівняно з характеристиками отриманими в статичних умовах.

По-друге при ударі частинки зерна в подрібнювачах і дробарках в основному руйнуються. Так як, вони не є однорідними аморфними тілами, та їх внутрішній зміст є більш м’який ніж оболонка і складний в хімічному плані. Наявність контактних напружень при циклічних характерах їх прикладання і хімічних факторів інтенсифікації процесів зношування елементів подрібнювальної камери. Виявлення механо-хімічних процесів при зношуванні зерновим матеріалом при його руйнуванні присвячено дуже мало досліджень. За винятком робіт [32], практично досліджувалась тільки динаміка зміни параметрів робочих органів без встановлення виду і характеру самого процесу зношування.

На фізико-механічні характеристики зернового матеріалу, в тому числі, на здатність його до руйнування при ударі, так і на зношувальну здатність впливає багато зовнішніх факторів.

Так, підвищення вологості матеріалу [33-38] приводить до зниження якості виконання технологічного процесу подрібнення із збільшенням витрат

енергії. На основі експериментальних досліджень Мельникова С. В. [39] встановлено, що при збільшенні вологості зерна на 1%, загальна кількість витраченої енергії на подрібнення збільшиться на 6%, а ступінь подрібнення зменшиться на 3%, при чому, продуктивність дробарки зменшиться.

Процеси руйнування зерна вивчалися Тарутиним П. П. та Орловим Н. М. [40] шляхом зняття діаграм напруги. Було визначено максимальні зусилля руйнування для різних видів зернових культур.

Дослідження Крагельського И. В. показали вплив розміру зерна на зусилля руйнування [41]. Встановлено, що при збільшенні величини зерен зменшується їх міцність і деформування виникають за рахунок зминання, в той час як більш дрібніші зерна руйнуються розколюванням.

Дослідженнями при збільшені витрат додаткової потужності на подрібнення зернових матеріалів, також займався Куприц Я. Н [42], а характеристиками при руйнуванні ударом Хусид С. Д. [3].

Вплив вологості зернового матеріалу на інтенсивність зношування робочих органів ударної дії встановлено в роботах Бойко А. І. [11]. Результати проведених експериментальних досліджень показали, що з підвищенням вологості твердість зерна знижується, а інтенсивність зношування матеріалів робочих органів зростає. Це вказує на те, що процес зношування залежить не лише від механічних характеристик зерна, але також і від хімічної активності компонентів середовища, що знаходиться в зоні удару і його руйнування. Бойком А. І. встановлені закономірності протікання процесів зношування для ряду матеріалів в залежності від швидкості удару, кута атаки, вологості зерна, наявності абразивних частинок та виду самого зернового матеріалу, що подрібнюється.

Встановлено, що інтенсивність зношування суттєво змінюється коли частинка зерна під дією робочого органу руйнується. Це відбувається при досягненні критичної швидкості, яка є характерною для кожної окремої зернової культури. В результаті руйнування зернини з поверхнею тертя, вступають в контакт хімічні складові її внутрішнього вмісту. Цей фактор

інтенсифікує процеси утворення та руйнування другорядних структур, тобто викликає підвищення інтенсивності зношування.

Соломка О. В. у своїх дослідженнях показників механічної міцності зернових матеріалів і енергоємності в процесі подрібнення виявив, що дані показники відрізняються і залежать від культури, сорту, вологості та розмірів [43].

Аналіз досліджень фізико-механічних властивостей зернових матеріалі [44-50] дає змогу встановити усереднені значення їх основних параметрів, які необхідні для розробки подрібнювальних машин для приготування кормових сумішей.

Значну увагу приділено вивченню ударного навантаження поверхонь зношування при взаємодії з твердими абразивними частинками. Очевидно, такий підхід продиктований необхідністю забезпечення в першу чергу довговічності швидкозношуваних деталей машин, що працюють в контакті з матеріалами мінерального походження. Теоретичні основи у вивченні природи ударно-абразивного зношування, як особливого виду руйнування поверхонь закладені працями радянських вчених Виноградова В. Н., Сорокіна Г. М. [51, 52] та інших.

Великий внесок у вивчення зношування потоком частинок внесений Клейсом І. Р. [53, 54], яким встановлено основні закономірності зношування матеріалів при різних співвідношеннях твердості, кінематичних і динамічних режимах навантаження. На основі вивчення контактної взаємодії поверхонь тертя з частинками різної твердості, форми і розміру розроблені положення про механізм зношування тіл в потоці абразивних частинок.

У роботах Ууемийса Х. Х. [55, 56] вперше розглянуто зношування деталей і руйнування частинок, як взаємопов’язані процеси, що протікають у подрібнювачах ударної дії. На підставі цього ним розроблені науково обґрунтовані напрямки в підвищенні зносостійкості і ефективності роботи помельного обладнання.

У зазначених роботах зношування матеріалів вивчено при контактній імпульсній взаємодії з частинками мінерального походження, що відрізняються кристалічною структурою, а також порівняно високою твердістю і крихкістю. У багатьох розглянутих випадках зношування представляється як мікрорізання при малих кутах атаки для м'яких матеріалів [57] або як втомлююче полідеформаційне руйнування при великих кутах атаки і багаторазовому циклічному навантаженні [41].

Загальним в даних роботах є те, що явище зносу і механізми його протікання досліджені за умови, коли твердість абразивних частинок неперевищує або дорівнює твердості зношуваного матеріалу. Тільки в деяких роботах зроблені спроби пояснення природи зношування при ударі частинками, твердість яких поступається твердості зношуваного матеріалу [58].

1.2. Аналіз конструкцій машин для подрібнення та сепарації зернової маси

Перші подрібнювачі зернового матеріалу появилися на прикінці XIX століття. Це привело до суттєвих змін в механізації приготування кормів і технічному забезпеченню тваринництва. В Україну більшість зернових подрібнювачів постачалось із Англії, Франції, Німеччини та США. Початок XX ст. характеризується створенням більш досконалих подрібнювачів зерна, а саме молоткових дробарок, які в порівнянні з іншими були більш універсальними та менш енергоємними.

Наприкінці 30-х років XX ст. в СРСР у зв'язку з проведенням колективізації сільського господарства постало питання відновлення випуску зернових подрібнювачів. Розробка нових зразків базувалась на попередньо-вивчених принципах руйнування зерна. Але науково-технічна база була ще досить слабкою і розробки в значній мірі виконувались із внесенням елементів технічних рішень, що вже набули попереднього застосування в

інших країнах. У зазначений період виготовлені та поставлені на виробництво вальцеві подрібнювачі та плющилки, жорнові млини та молоткові дробарки. Аналіз потенційних можливостей і питомих показників роботи зернових подрібнювачів поставив їх на домінуюче положення.

На території України поширеного розвитку конструкторські організації з проектування та випуску машин для потреб тваринництва набули, лише, в середині XX ст. Це дало поштовх для розробки універсальних дробарок ДКУ–М, ДКУ–1, КДУ–2, КДМ–2, КДМ–3 з продуктивністю 2-3 т/год. [59]. Дещо згодом (1973–1984 рр.) в результаті нових досліджень процесу подрібнення зерна молотковими дробарками розроблено нові конструкції з продуктивністю 4–5 т/год., це були зернові дробарки ДБ–5, ДМБ–5, ДКМ–5 (універсальна).

Значна кількість технічних рішень подрібнювачів зерна накопичувалась, розширюючи зону застосування, що привело до появи великої різнотипності машин з низьким коефіцієнтом уніфікації деталей, а відповідно і великої різновидності заводського технологічного оснащення. Крім того, ускладнювались умови ремонту дробарок. Таке протиріччя, починаючи з 70-х років, вирішувалося шляхом побудови рядів однотипних подрібнювачів [60].

В середині 80-х років минулого століття почали розробляти спеціальні зернопереробні машини малої продуктивності, серед яких найбільшого розповсюдження набули: подрібнювач зерна молотковий «Таврія»; подрібнювач зерна і коренеплодів ИЗК–1; молоткова дробарка ДЗ–0,1 та ДЗ–Т–1; дробарка зерна і коренеплодів ДЗК–1; дробарка зерна і трави ДЗТ–П [61-63].

У 90-і роках значної уваги набули роботи з підвищення довговічності дробарок та їх робочих органів за допомогою конструкторсько-технологічних методів. Такий напрямок в поєднанні з застосуванням деталей підвищеної довговічності дозволив значно підняти ресурс дробарок та зменшити витрати на проведення їх ремонту [12].

Пізніше було налагоджено випуск ряду нових машин для подрібнення зерна: зерноподрібнювач ЗИ–1 (Київський редукторний завод); подрібнювач КД–1 та КД–2 (ВАТ «Мотор Січ», Запоріжжя); подрібнювач із заточувальним пристосуванням ИЗ–Т–1–1 (ВАТ «Новоград-Волинськсільмаш»); кормоприготувальна машина КМП–Т–2 для подрібнення зерна і коренеплодів (Уманський дослідний завод сільгоспмашинобудування) [64-66].

Викладені вище дані про розвиток зернопереробної техніки свідчить про те, що в процесі технологічної та технічної доробки машин було використано багато раціональних доповнень, які в цілому дозволили підняти їх технічний рівень, зменшити економічні затрати і автоматизувати процес переробки зерна.

На даний час ринок України пропонує різноманітні зразки подрібнювачів, загальний випуск яких перевищує 20 тисяч штук. Найбільшого розповсюдження серед подрібнювачів набули решітні, які використовуються як на великих, так і на малих фермерських господарствах. Вони призначені для подрібнення різних видів фуражного зерна з вологістю до 17% та вітамінного борошна і використовуються для всіх видів тварин.

За принципом дії, технології роботи, конструктивними особливостями та функціональними можливостями подрібнювачі для переробки зернового матеріалу поділяються на ряд груп [67]:

- відкритого і закритого типу;
- з периферійною і центральною подачами сировини в робочу камеру;
- з горизонтальним і вертикальним розміщенням барабана;
- з шарнірно підвішеними робочими органами на барабані та жорсткими кріпленнями;
- з циліндричними і боковими решетами або без решіт;
- з вихровими пристроями і без них;

- універсальні і спеціалізовані (для подрібнення продукту одного виду).

Технологічний процес подрібнення зернового матеріалу відбувається в спеціальних робочих камерах, основними елементами яких являються молотки, решета та деки, що здійснюють руйнування зернин. Відносно проста конструкція молоткових подрібнювачів дозволяє широко використовувати їх у різних галузях промисловості в тому числі і сільському господарстві.

Світовими лідерами з виробництва машин для подрібнення зернового матеріалу, у яких процес розділення вихідного продукту відбувається за рахунок решітних сепараторів є компанії: ЗАО «Легас», «УДАЛЕЦ», ООО «Доза-Агро», ОАО «Капитал-Прок» (Білорусія), ООО «АЛДИ», ОАО «Слободской машиностроительный завод» (Росія), «BUSCHHOFF», «HIMEL», «NEUERO» (Німеччина) та інші.

Німецька фірма «BUSCHHOFF» випускає решітні подрібнювачі серії Bhs Duo, BHOS, BHS. Завдяки автоматичному режиму роботи їх конструкція допускає використання машин в нічний час. Подрібнювачі відрізняються енергетичною економічністю: вся потужність, що споживається використовується тільки на подрібнення зерна [68].

Продуктивність подрібнювачів BHOS (рис. 1.1) складає 1950-8500 кг/год., в залежності від встановленого решета у подрібнювальній камері та матеріалу сировини, що переробляється.

У молоткових подрібнювачів серії BHS (рис. 1.2) в конструкції яких застосовуються вентилятори, продуктивність при подрібненні складає 470-1200 кг/год., що дозволяє ефективно їх застосовувати на малих фермерських господарствах.

Фірмою «HIMEL» (Німеччина) розроблені і випускаються решітні дробарки серії HS (рис. 1.3) [69] та GMS, обладнані механізмом автоматичного налаштування ступеня плинності зернових і невисокої

продуктивності. Це робить їх найбільш придатними для індивідуальних малих фермерських господарствах.

Рис. 1.1. Загальний вигляд подрібнювач BHOS (Німеччина)

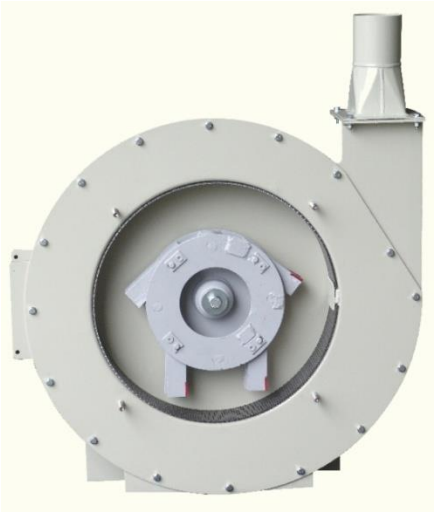


Рис. 1.2. Загальний вигляд подрібнювач BHS (Німеччина)

Конструкція подрібнювачів серії SK (рис. 1.4) відрізняється вертикально розміщеним ротором, який має привід від електродвигуна. Модульні модифікації цих подрібнювачів мають в межах від 1500 до 6000 кг/год, що дає змогу широкого їх використання в різних господарствах. Завдяки автоматичному налаштуванню об’єму подачі зернових, гарантується повне використання потужності без ризиків на перевантаження механізмів.

Обладнання для подрібнення зернового матеріалу серії RVO фірми «NEUERO» (Німеччина) (рис. 1.5) дозволяє ефективно переробляти зерно при вологості до 20%. Для цього збільшена площа розміщених решіт [70]. Дробарки отримали широке розповсюдження завдяки високій продуктивності при невеликих витратах енергії і є досить простими в обслуговуванні.

Польська фірма «SkjoLd» виготовляє дробарки двох типів ВМ-2 і СМ-2 [71]. Камера для подрібнення зерна дробарки ВМ-2 складається з

решіт у вигляді стальних листів з отворами і ротора, на деяких осях якого закріплені ступінчаті молотки, а на інших - лопатки.

Рис. 1.3. Загальний вигляд дробарки «HIMEL» серії HS (Німеччина)

Рис. 1.4. Загальний вигляд дробарки «HIMEL» серії SK (Німеччина)

Рис. 1.5. Зернодробарка молоткова серії RVO (Німеччина)

Подрібнювачі сировини серії Molot (Росія) (рис. 1.6) виготовляються різноманітних модифікацій і призначені в основному для тонкого

подрібнення сухих продуктів. На сьогоднішній день, саме такі машини є найпродуктивнішими за тонким подрібненням сировини, розділення якого відбувається встановленими решетами [72].

Конструктивною особливістю зернодробарк ДКР (Росія) (рис. 1.7) є пневматичне завантаження і вивантаження матеріалу. Вони використовуються для подрібнення зернових та олійних культур з вологістю до 14% і можуть застосовуватись автономно або вбудовуватися в лінії для приготування повнораціонних комбікормів в умовах малих та середніх господарствах [73]. Однорідність отриманої фракції забезпечується за допомогою встановлення сепаруючого робочого органу (решета).

Рис. 1.6. Дробарка молоткова Molot-5000 (Росія)

Рис. 1.7. Зернодробарка ДКР (Росія)

Білоруська компанія «Доза-Агро» пропонує варіанти конструкції малогабаритних решітних подрібнювачів ИЗК–1 та ДЗК–1, які призначені подрібнювати зерно, коренеплоди, а також відходи овочів та фруктів в основному для малих тваринницьких ферм [74].

Компанія «Легас» (Білорусія) виготовляє дробарки КД–2А (КУ–203), що за своєю конструкцією практично не відрізняються від кормодробарки КДУ –2, де всі вузли повністю взаємозамінні [75]. Запропонована машина призначена для подрібнення зернових і не зернових компонентів комбікорму (шрот, макуха, трав'яне борошно, і т.д.).

Широкого застосування в господарствах на території України набули універсальні молоткові кормодробарки КДУ–2, призначені для переробки всіх видів зерна, коренеплодів, силосу та зеленої маси. Їх також можна використовувати в комплексі з обладнанням кормоцехів для приготування різних кормових сумішей.

Менш поширеним обладнанням для подрібнення зернового матеріалу є подрібнювачі із багатоступеневою організацією робочого процесу. Багатоступеневість передбачає необхідність безпосередньо перед подрібненням розділення зерна на фракції за фізико-механічними властивостями та ізольованого завантажування його при переході від одного ступеня подрібнення до іншого. Проте, на думку дослідників [76-79] поряд з усіма перевагами організації такого робочого процесу суттєво ускладнюється конструкція машини, що робить її більш металомісткою. Це не виправдовує незначне покращення якості подрібнення та зниження енергоємності процесу.

Існують, також, подрібнювачі з вертикальним розташуванням вала ротора робочої камери. На думку дослідників [77-78, 80-82] в таких машинах більш повного використовується енергія руйнування частинок. В результаті мінімізується переподрібнення зерна. Причому прямий удар руйнування здійснюється тонкими робочими елементами у вигляді пальців, стрижнів та іншими голкоподібними робочими органами [83-84]. Дослідженнями доведена перевага тонких молотків, які носять більш сконцентрований удар і мають менший опір повітряного потоку.

Таким чином, у світовій практиці існує велика різноманітність конструкції зернодробарок. В основному вони обладнанні робочими

органами ударної дії та класифікаторами вихідного продукту у вигляді сепаруючих решіт. Відмічається недостатня довговічність деталей подрібнювальної камери, які потребують періодичних замін.

Розроблені моделі універсальних машин, які використовуються не тільки для подрібнення різного виду зерна, але і для переробки коренеплодів, качанів кукурудзи, сіна та культур, в яких міститься масло. Такі машини можуть швидко, якісно та без значних затрат обробляти досить значну кількість сировини.

1.3. Огляд та аналіз особливостей конструктивних рішень сепаруючих робочих органів

Основним робочим органом за допомогою якого можна регулювати величину подрібнених частинок зерна, що являється головним показником якості приготування кормів, а також відкалібрування частинок на зерноочисних машинах є решета. Завдяки своїй універсальності решета застосовуються в різних галузях промисловості: харчовій, будівельній, хімічній, медичній, гірничій, а також у сільському господарстві. Вони встановлюються у дробарках, крупорушках та зерноочисних машинах і можуть застосовуватися на всіх стадіях переробки, очищення, сепарація, калібрування, сортування, лущення та подрібнення зерна.

Очищення зернових культур від домішок проводиться за допомогою решітних сепараторів різної конструкції, які дозволяють відкалібрувати зерно за розміром та формою. У решітних сепараторах завдяки просіюванню через решето вихідний матеріал розподіляється на фракції, які мають різні за розмірами частки. Отвори решіт, залежно від призначення, можуть бути різної форми (рис. 1.8): прямокутні подовгуваті (а, б, в, г, д), трикутні (ж), лійкоподібні (з). Крім цих є ще отвори: жолобчасті, ромбоподібні, шестикутні, зірчасті та округлі. Розташування отворів також може бути різним: рядами по шестикутнику або в шаховому порядку (з, к, л).

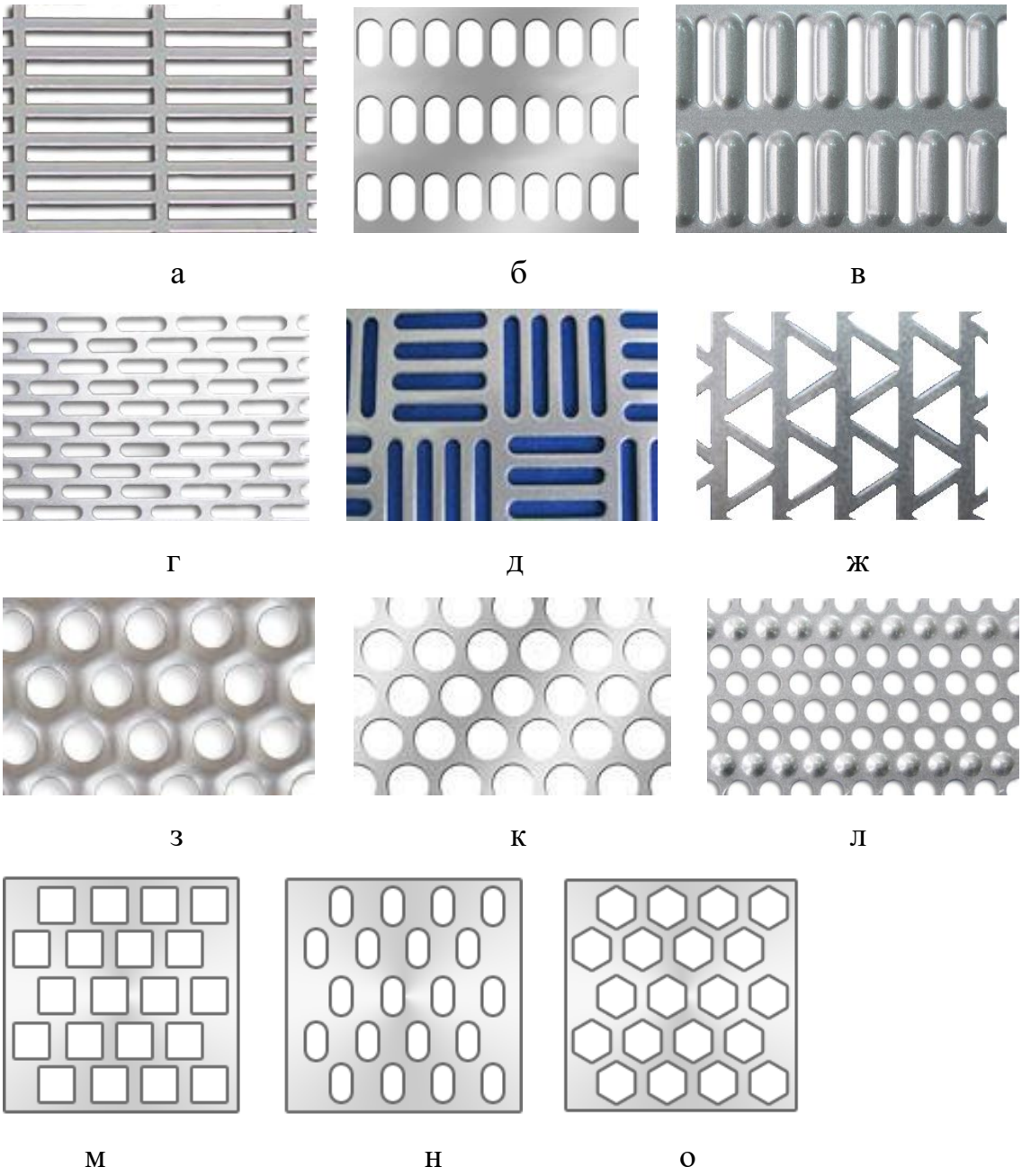


Рис. 1.8. Види сепаруючих решіт: а) із прямокутними отворами; б) прямокутні отвори зі округленими торцями); в) прямокутні отвори і випуклостями; г) прямокутні отвори із округленими торцями та симетричним зміщенням; д) повернуті прямокутні отвори; ж) трикутні отвори; з) лункоподібні отвори круглі розташовані по шестикутнику; к) круглі отвори розташовані по шестикутнику; л) шах матне розташування отворів; м) квадратні отвори; н) прямокутні отвори розташовані в шахматному порядку; о) шестикутні отвори розташовані по шестикутнику.

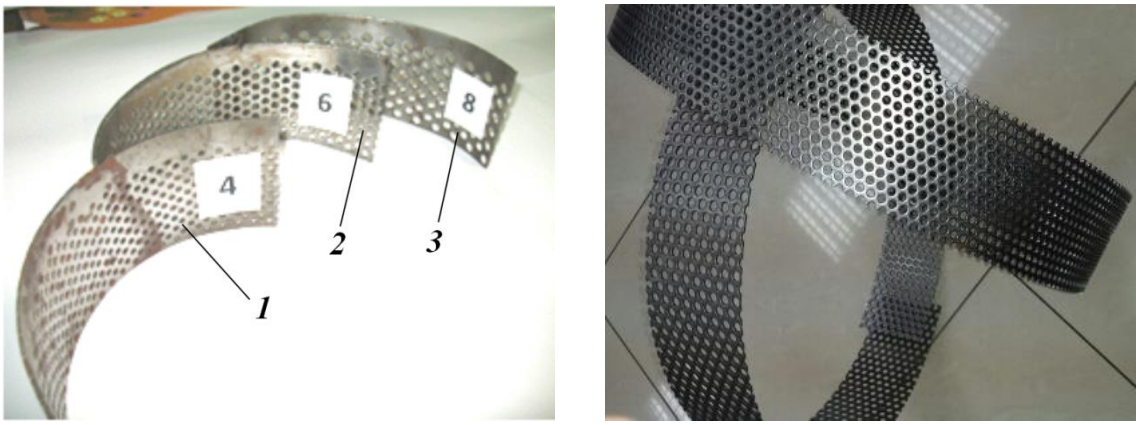
Деякі з представлених конструкцій сепаруючих решіт використовуються на зерноочисних машинах типу ОВС, БИС та БЦС [85-88], які призначені для первинної та вторинної очистки зернових культур від сміттєвих домішок на токах та в закритих складських приміщеннях. Крім того решета встановлюються на сепараторах: БСХ, ЗВС-25, ЗАВ-40, К34-40, МЗП-50, СПО-50 та Р6-СВС-6, що застосовуються для попередньої та первинної очищення зернових і олійних культур при підготовці насіння до посіву [89]. Промисловість випускає машини не великої продуктивності з аналогічним принципом роботи: сепаратор вібровідцентровий зерновий Р8-БЦСМ-50 та Р8-БЦСМ-25 продуктивністю 50 та 25 т/год. В цілому обладнання для обробки зернового матеріалу відрізняється широким асортиментом машин, які обладнані досить великою різновидністю решіт з отворами різної конфігурації.

У гірничій промисловості решета використовуються у грохотах при виконанні операції сортування, яка виконується з метою попереднього поділу роздробленого каменя і гравійної суміші на окремі сорти за розмірами (фракції). Робочою поверхнею у грохотах називають плоскі, рідше циліндричні або конічні поверхні, що мають отвори, на яких здійснюється процес розділення матеріалу. Застосовуються решета виготовлені із сталевих листів з штампованими або просвердленими отворами різної форми [90].

У сільськогосподарському виробництві, комбікормовій та мукомельній промисловості найбільшого розповсюдження отримали молоткові подрібнювачі із застосуванням у конструкції решітних сепаруючих робочих органів. За допомогою таких сепараторів контролюється крупність помелу, а значить і якість вихідного продукту. Практикою експлуатації подрібнювачів зернового матеріалу відмічається низька довговічність решіт, напрацювання до відмови яких становить не більше 1000-1070 т.

У молоткових подрібнювачів сільськогосподарського призначення знайшли поширення пробивні решета із круглими отворами діаметром 2–10 мм. Отворами охоплена більша частина поверхні решета (рис. 1.9). Вони

виготовляються з використанням суцільних металевих листів, товщина яких становить 1–3 мм [91] в залежності від потреб замовника.



а б

Рис. 1.9. Загальний вигляд змінних решіт:
а) секторіальні решета; б) кільцеві решета.
1 – решето з отворами діаметром 4 *мм*; 2 – решето з отворами діаметром 6 *мм*; 3 – решето з отворами діаметром 8 *мм*.

Проведений аналіз конструктивних особливостей решіт показує, що для ефективної сепарації матеріалів знайшли застосування різні форми прохідних отворів. Однак, в більшості враховуючи особливості технології виготовлення, отвори мають круглу циліндричну форму, як найпростішу у пробиванні. Фракційний склад вихідного матеріалу визначається розміром отворів, а товщина решета впливає на його довговічність. Технологічність виготовлення решіт встановлюється в залежності від можливостей виробництва і побажань замовника.

1.4. Аналіз пошкоджень робочих органів подрібнювачів та причини виникнення відмов

Обладнання для подрібнення зернового матеріалу експлуатується у складних умовах при високих швидкостях та ударних навантаженнях

зерновими частинками. Додатково на механізми впливають випадкові силові та вібраційні фактори, які обумовлені нерівномірністю подачі маси. Основним фактором, що найбільш впливає на пошкодження і вихід з працездатного стану основних деталей подрібнювальної камери є їх взаємодія із зерновим матеріалом. Найменш довговічними деталями камери є молотки, відмова яких складає 27% від загальної кількості відмов дробарок, далі решета – 21% та колеса вентилятора – 19% [15, 92].

Досвід експлуатації подрібнювачів кормів показує, що їх деталі і вузли зношуються з різною інтенсивністю. Це пояснюється тим, що окремі деталі і вузли виготовлені з різних матеріалів. Матеріали деталей знаходяться в різних умовах дії зернового матеріалу, а також мають різну зносостійкість та початкову конструктивну форму. Так, наприклад, робочі органи (молотки, решета, дека та ін.) несуть більше навантаження, ніж інші деталі камери. Крім того, спряжені деталі мають розбіжність в допусках на розміри посадки. В результаті цього, одні і ті ж спряження відрізняються зазорами або натягами, що впливає на процеси їх зношування. Відмови деталей, що обумовлені зношуванням займають основну (до 80%) долю серед інших відмов, характерних для подрібнювачів, і проявляються з часом експлуатації машин [93].

Для більшості молоткових дробарок основний вплив на інтенсивність зношування деталей подрібнювальної камери належить швидкісному фактору відносного руху молотків і потоку зерна. Крім того важливу роль має імпульсне контактне ударне навантаження. Подрібнений матеріал, під дією повітряного потоку попадаючи на решета через отвори видаляється з робочої зони. Зазвичай використовується автономний вентилятор, який розташований на валу ротора або оснащений окремим приводом. У деяких випадках вентилятор і ротор суміщені, в результаті чого повніше використовується дія повітряного потоку. У лопатях вентилятора найбільший знос припадає на місце згину (рис. 1.10).

Рис. 1.10. Зношене колесо вентилятора

Причиною недостатнього рівня подрібнення продукту є: нерівномірність подачі, знос робочих поверхонь молотків, рифів верхніх та нижніх дек та поверхонь отворів змінних решіт [94].

Нерівномірне зношування обертових деталей, як правило збільшує її вібрацію, що призводить в подальшому до відмов підшипників, виникнення тріщин, руйнування корпусів циклонів і кронштейнів, а також послаблення болтових з’єднань [15].

Іншими причинами проявлення окремих пошкоджень та відмов є недостатня якість виготовлення деталей і вузлів. Невідповідність матеріалів, відхилення від технології виготовлення, включаючи шорсткість поверхні та фінішну обробку, відсутність технічного контролю призводить до виникнення відмов подрібнювачів в процесі їх експлуатації. Перераховані причини призводять до виникнення відмов в механізмах приводу, трансмісіях, бункерах і проявляються у вигляді перекосів, руйнування валів та кронштейнів від втомленості матеріалу, тріщин зварних швів. Певна частина відмов є наслідком недосконалості у конструкторських рішеннях і розрахунках, виборі матеріалів або ж обґрунтуванні конструктивних параметрів деталей [95].

Швидкість удару молотків є одним з основних факторів, що впливає на ефективність подрібнення зерна. З її підвищенням збільшується імпульс

навантаження і частота ударів по частинкам зернової маси. При цьому зростає ступінь подрібнення і інтенсивність зношування деталей камери [11]. Зношування молотків призводить до зміни їх маси і форми (рис. 1.11). Для забезпечення необхідної якості продукції молотки переставляють на нову робочу грань або замінюють на нові. Спостереження показали, що найбільшу інтенсивність зношування мають крайні молотки, розміщені біля стінок камери [96].

Нерівномірність зношування молотків по довжині подрібнювальної камери відмічається в дослідженнях [38, 96-100]. Нерівномірність зношування можна пояснити недоліками у конструкції подрібнювальної камери, ротора зернодробарки та механізму завантаження зерна [101-103].

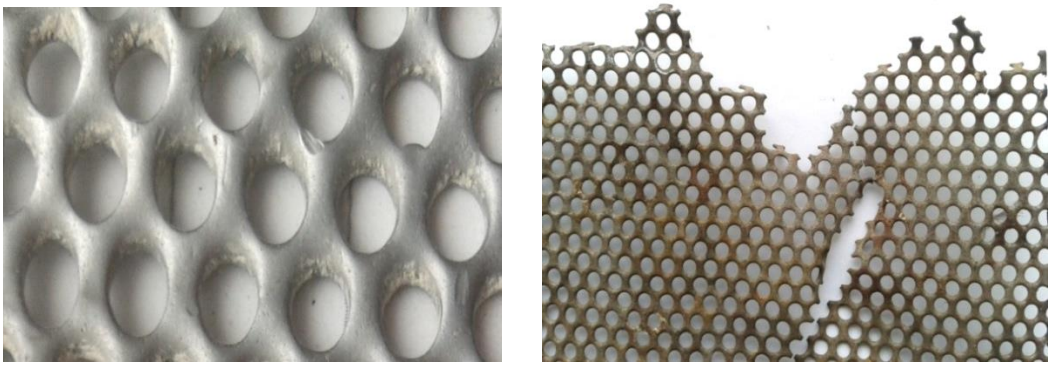
Рис. 1.11. Втрата форми і маси молотків дробарки при спрацюванні

Подрібнення зерна відбувається, насамперед, при нанесенні ударів молотками об зерна, що призводить до розколювання зернин на окремі частинки. Частки спрямовуються на робочу поверхню решета де зернова маса з частками, що не пройшли крізь отвори захоплюється у повітряний потік і під дією повторних ударів та встановленої деки додатково доподрібнюється. Удари частин зерна об грані решета призводить до додаткового їх руйнування. При інтенсивному русі даного зернового потоку відбувається зношування отворів решета (рис. 1.12 *а*).

У випадках попадання сторонніх, в основному неметалевих предметів, що не вловлюються магнітним захистом виникає аварійне пошкодження решіт, їх пробивання (рис. 1.12 *б*).

Проведені дослідження [12, 15, 103] показують, що середній наробіток на відмову решіт дробарок для подрібнення зернового матеріалу становить 1070 т, а стирання гострих граней отворів решіт спостерігається уже після досягнення 53-80 т. У разі продовження використання зношених решіт в результаті збільшення прохідних отворів погіршується якість вихідного подрібненого продукту.

Особливості конструкцій сепаруючих решіт відіграють важливу роль для забезпечення якості вихідного продукту, проте надійність таких робочих органів досить низька і відповідає 21% від усіх відмов зернодробарок.



а б

Рис. 1.12. Пошкоджені решета дробарки:

а) зношене решето; б) аварійно пошкоджене (пробите) решето.

Таким чином, надійна робота зернодробарок залежить від багатьох факторів, які часто знаходяться у складній взаємозалежності. Формування відмов зумовлює порушення, насамперед, геометричних форм деталей і їх спряжень, що приводить до зниження рівня надійності дробарок.

1.5. Напрями робіт по підвищенню довговічності сепаруючих решіт

Як вказувалось вище, одним з основних недоліків зернодробарок є те, що процес подрібнення зерна неминуче пов'язаний з інтенсивним зношуванням граней отворів сепаруючих решіт.

На сьогодні в підвищенні довговічності деталей сформувалися два основні напрямки: конструктивний і технологічний.

Конструктивний напрямок отримав розвиток завдяки пошуку таких форм отворів, які краще забезпечують виконання основного технологічного процесу розділення суміші на фракції. Проблема довговічності отворів в цих роботах піднімається не завжди і в основному, як супутній фактор в забезпеченні продуктивності і якості помелу.

Технологічні методи підвищення довговічності сепаруючих робочих органів не знайшли свого розповсюдження. Незважаючи на велику різноманітність цих методів, матеріалів і технологій зміцнення поверхонь, інформація про їх впровадження відсутня. Очевидно причина цього полягає в тому, що фактично в решетах робочі поверхні по всій сутності займають незначну площу в порівнянні із загальною поверхнею всієї деталі. Крім того практична реалізація технологічних методів зміцнення представляє певні труднощі виробничого характеру.

В удосконалення конструкцій сепаруючих робочих органів подрібнювачів значний вклад внесли: Ревенко І. І., Сироватка А. А., Шмат С. І., Моисеев А. А., Тимановський А. В., Карпенко М. І., Рожківський М. Ф та інші [104-109]. В своїх роботах автори пропонують різні підходи до вирішення проблеми підвищення ефективності використання решіт в тому числі і молоткових дробарок сільськогосподарського призначення. В той же час, зношуванню і втратам працездатності решіт, як основних сепаруючих робочих органів дробарок, приділено значно менше уваги.

Початкові форми отворів сепаруючих решіт дробарок можуть бути різними в залежності від призначення дробарки і матеріалу подрібнення (рис. 1.8).

Загальним для всіх представлених форм отворів є характерний вид пошкоджень їх зношування. В результаті зношування відбувається збільшення розмірів отворів, що знижує якість і ефективність сепарації. При цьому погіршуються показники роботи дробарки.

В досліджені [103] відмічається не тільки інтенсивне зношування решіт, але і нерівномірність його розподілення по ширині робочої камери. Отвори досить швидко втрачають свою початкову форму, особливо в нижній частині камери. За результатами досліджень було запропоновано комбіноване решето, яке складалось з двох або кількох частин з'єднаних між собою заклепками або болтами.

У роботі [44] представлені розрахунки та встановлено, що для підвищення пропускної здатності решета потрібно підняти ймовірність проходу подрібнених частинок крізь отвори. Це може бути досягнено за рахунок збільшення кількості самих отворів на решеті. Пропускна здатність також зростає при зменшенні подачі зерна та збільшенні числа обертів ротора, однак це може негативно вплинути на основні показники дробарки.

Дослідженнями Макарова А. П. [110-111] встановлено, що при зносі граней отворів решета якість подрібненого продукту дещо погіршується та частково збільшуються витрати енергії. Для продовження роботи і збільшення ресурсу запропоновано перевертати решето на іншу, незношену сторону.

Заслуговують на увагу результати дослідження [112] де встановлено, що підвищення довговічності решіт може бути досягнуто за рахунок створення гофрованої форми решета з кутами нахилу поверхонь 66,5° та 36°. Як вказується в запропонованій роботі, така форма поверхні не тільки позитивно впливає на продовження терміну експлуатації решіт, але й зберігає їх сепаруючі властивості.

У дослідженні [103] для підвищення довговічності запропоновано збільшити перемички між отворами решіт в напрямку руху продукту з 9 до 12 мм, а самі отвори розташувати на вершині витягнутого (неправильного) шестикутника. Міцність та довговічність таких решіт збільшується на 30…40%, але продуктивність дробарки зменшується до 9%. Звісно це негативно впливає на роботу дробарки.

В результаті подальших розробок, авторами роботи [103] було запропоновано нове, більш міцніше гофроване решето (рис. 1.13), яке додатково виконувало функцію деки. Продуктивність, при цьому збільшилося на 23…27%, а довговічність до 40%.

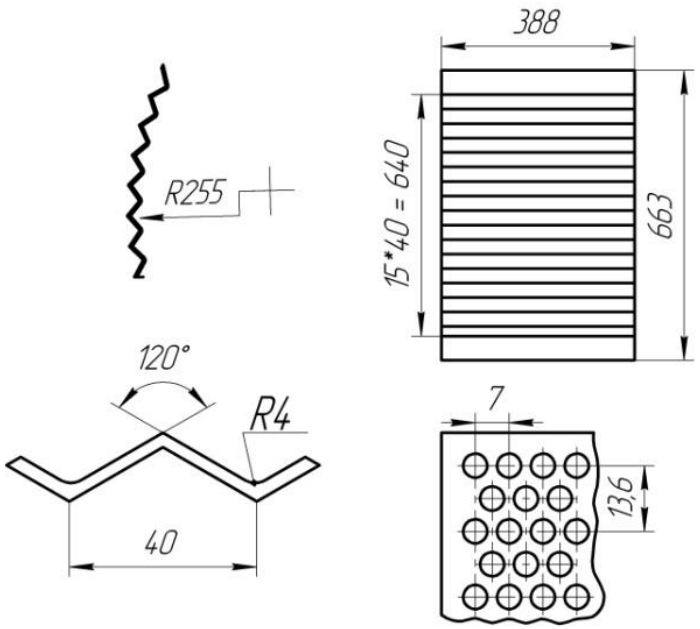


Рис. 1.13. Гофроване дека-решето підвищеної довговічності і продуктивності

Практика експлуатації дробарок сільськогосподарського призначення і досвід деяких господарств підтвердили можливість підвищення ресурсу решіт за рахунок перестановки їх на 180° або вигинати їх в іншу сторону, при зносі кромок отворів. При цьому довговічність зростає у 1,3…1,5 рази [113].

Зменшенням розмірів отворів решіт підвищує ступінь подрібнення продукту, тому було запропоновано регулювання зміни площі отвору [114].

Конструкція такого решета складається з двох суміжно контактуючих частин, що мають можливість відносного переміщення площин. Таким чином, відкривається можливість зміни величини загального прохідного отвору (рис. 1.14).

За рахунок такого конструктивного рішення решета вдається отримувати продукт з необхідним модулем помелу, що підвищує експлуатаційні можливості дробарок. Нажаль в роботі відсутня інформація стосовно елементів конструкції таких решіт. Однак, із запропонованого рішення багато, що є очевидним в ускладнені сепаруючого робочого органу. Поруч з цим відсутні дані про вплив конструктивних змін на підвищення довговічності і збереження форми отворів.

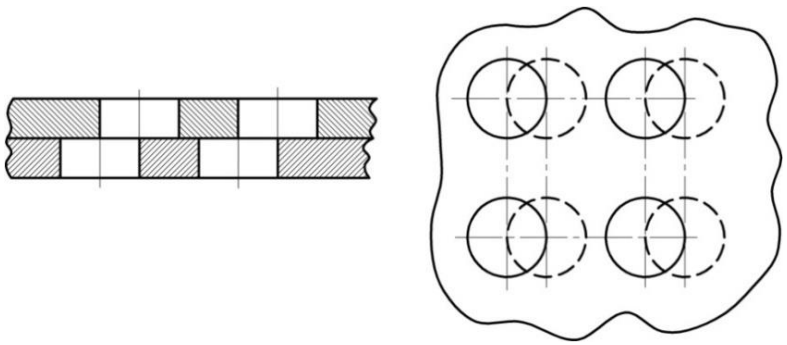


Рис. 1.14. Решето, що регулюється переміщенням двох контактуючих суміжних частин

У дослідженні [115] запропоновано для сепарації суміші використовувати циліндричне решето виконане з отворами, діаметр яких зменшується в напрямку обертання ротора дробарки. При цьому, висота рифів на деках, також пропорційно зменшена, відповідно, до розмірів отворів. Можливе, також, виконання циліндричного решета і рифленої деки у вигляді окремих секцій, що сприяє зручній їх заміні для одержання необхідної якості подрібнення або у випадку заміни при виникненні несправностей. Доступність заміни решета і деки підвищує ремонтопридатність подрібнювальної камери, скорочується час на

відновлення працездатності дробарки, а значить підвищує коефіцієнт її готовності до експлуатації.

Хвиляста форма решета змінної кривизни запропонована в роботі [116] (рис. 1.15).

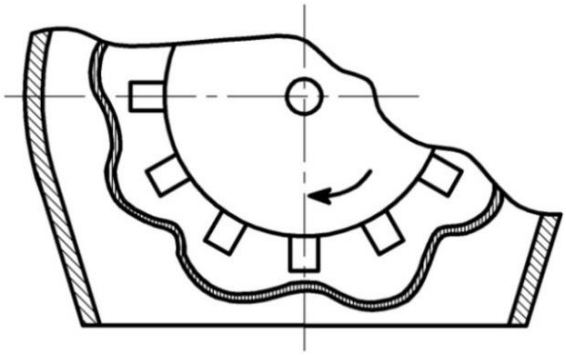


Рис. 1.15. Хвиляста форма решета змінної кривизни

Ділянки різної кривизни, запропонованого решета чергуються і мають форму опуклої та вгнутої поверхонь плавно сполучених між собою. Змінний радіус кривизни поверхні дає можливість на випуклих ділянках здійснювати процес сепарації зернової маси, а на вгнутих додатково активізувати їх подрібнення з сепарацією. Часткове розділення функцій стає можливим завдяки різним кутам атаки, що виникають між робочою поверхнею решета і вектором швидкості руху зернових частинок. Слід очікувати, що зношування таких ділянок буде протікати з різною інтенсивністю. Однак, досліджень в цьому напрямку, крім робіт [117], проведено ще не достатньо. У дослідженнях [118] було запропоновано решето, яке виконано опуклим в бік зарешітного простору, та охоплює всю частину подрібнювальної камери.

Заслуговують на увагу результати досліджень [119], що дозволяють збільшити продуктивність дробарки, знизити енергоємність процесу та підвищити якість одержаного продукту за рахунок нерухомого і рухомого решета, отвори якого мають прямокутну форму. Рухоме решето може переміщатися по колу подрібнювальної камери, вздовж нерухомого на відстані, яка не перевищує довжину отвору решета.

У дослідженні [120] для підвищення ефективності процесу подрібнення запропоновано встановлення решета по периферії подрібнювальної камери у вигляді окремих сегментів. Це забезпечує зменшення швидкості обертального руху частинок в середині камери за рахунок виступаючих тилових поверхонь отворів.

В результаті пошукових робіт запропоновано нове конструктивне рішення комбінованого решета [121]. Воно відрізняється тим, що між виступами робочої поверхні розміщаються сепаруючі отвори. Через ці отвори із подрібнювальної камери проходять частинки, що утворилися при ударі об виступи решета (рис. 1.16).

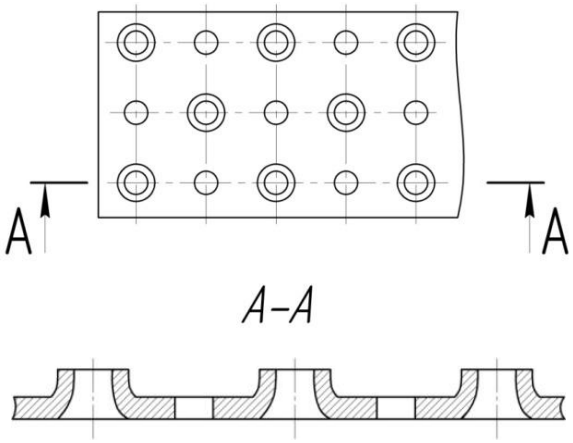


Рис. 1.16. Комбіноване решето

Радикальним засобом забезпечення необхідної довговічності класифікаторів зернодробарок слід вважати розробку конструкцій в яких розділення подрібненої суміші здійснюється без застосування решіт. Безрешітні дробарки принципово позбавлені недоліку зношування сепараторів. Про те, виникають інші проблеми пов’язані із якістю подрібнення суміші і зношуванням додатково встановлених дек і арматури розділення потоків.

Проміжні положення між решітними та безрешітними дробарками займають машини оснащені решітчастою декою (рис. 1.17).

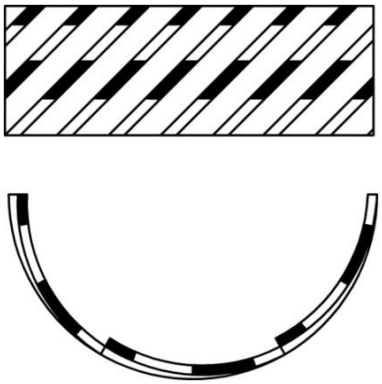


Рис. 1.17. Решітчаста дека сепаруючого робочого органу дробарки

Такий комбінований робочий орган має ступінчасту робочу поверхню, із змінним зазором до молотків Приведене технічне рішення направлене, насамперед, на підвищення продуктивності дробарки [122]. Однак збільшення тертя в зазорі між декою та молотками, призводить до інтенсифікації процесів зношування як решітчастої деки, так і молотків.

В деяких конструкціях дробарок запропоновані повздовжні розрізи (рифи), які розміщені під кутом до напрямку руху зернових частинок. Таке удосконалення на думку авторів, підвищує ефективність подрібнення і сепарації (рис. 1.18), однак не приводиться даних стосовно рівня надійності представленого робочого органу.

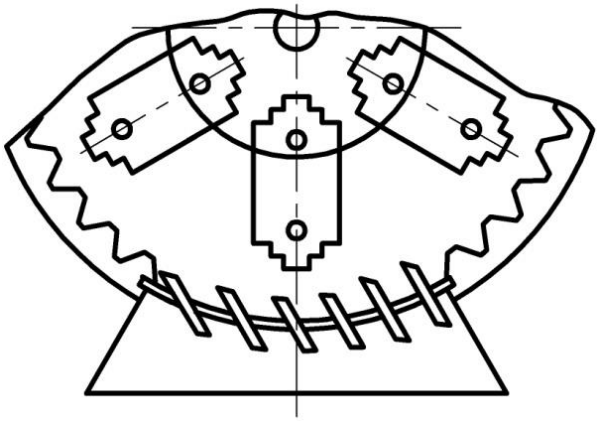


Рис. 1.18. Решітка, що виконана в вигляді пластинчатих жалюзей

Запропонована в роботі [123] конструкція дробарки має по периметру робочої камери рифлення, яке на виході із робочої зони переходить в решітку у вигляді пластинчатих жалюзей з можливістю зміни кута нахилу пластин.

У дослідженні [124] запропоновано конструкцію, де на місті решета встановлюється рифлена дека з отворами округлої форми (рис. 1.19). В такому випадку знижуються енергозатрати на подрібнення і можна вважати, що таке удосконалення є економічно-ефективним.

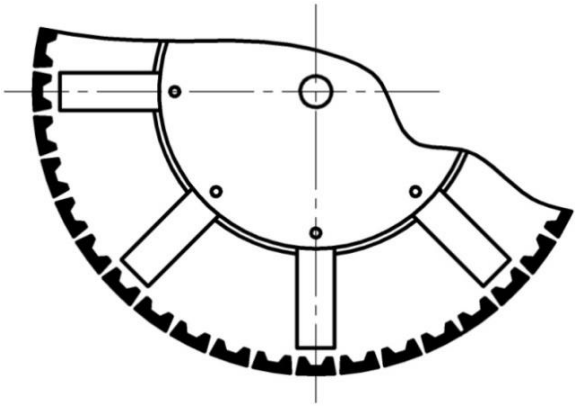


Рис. 1.19. Рифлена дека з отворами для сепарації

Різновидність конструктивних рішень сепаруючих робочих органів обумовлена, насамперед, бажанням підвищити ефективність подрібнення зернової маси. проблемі забезпечення необхідного рівня надійності робочих органів приділено значно менше уваги. В результаті незважаючи на отримані позитивні результати в якості подрібнення досягнена довговічність запропонованих подрібнювачів, як правило, не задовольняє практику експлуатації.

Таким чином, представлений аналітичний огляд показує, що робочі елементи подрібнювальних камер зернодробарок в наслідок постійної взаємодії з масою при її подрібненні і сепарації піддаються інтенсивному зношуванню з поступовою втратою працездатності. Проведені удосконалення конструктивних рішень сепаруючих робочих органів в основному направлені на підвищення продуктивності і якості виконання

процесу сепарації, в той час як підвищенню надійності решіт приділено недостатньо уваги.

Проведений аналіз показав, що домінуючими рішеннями при удосконаленні сепаруючих робочих органів дробарок є конструктивні. Очевидно це пов’язано з особливостями умов експлуатації і технологій виготовлення решіт, де застосування зміцнюючих покриттів або зносостійких матеріалів не є технічно доцільним і економічно виправданим.

1.6. Принцип застосування природного зношування деталей машин для підвищення їх довговічності

Зношування є природним енерговитратним процесом в результаті проходження якого втрачається первинна форма і маса деталі. Досвідом експлуатації машин встановлено, що первинна форма деталей в процесі зношування змінюється на таку, яка характерна для тривалого періоду їх роботи. При цьому інтенсивність зношування, як правило, зменшується і незважаючи на збільшення самої величини зношування, отримана припрацьована форма деталей зберігається. Тобто, в природі контактної взаємодії деталей будь-то в закритих чи відкритих вузлах тертя, спостерігається поступове розвантаження дільниць з високим тиском і перерозподіл зусиль на всю поверхню тертя. Таким чином, сама природа контактної взаємодії тіл і зношування в результаті переміщення оптимізує поверхні тертя до таких, які зношуються мінімально. Поверхні, що утворюються в результаті розглянутих процесів припрацювання названі поверхнями природного зношування.

Правомірна постановка питання пошуку первинної конструктивної форми поверхонь деталей, які б мали мінімальну інтенсивність зношування. Це можливо тільки тоді, коли запропонована форма природного зношування деталі не вступає в протиріччя з її функціональним призначенням. Тобто, деталь повинна виконувати свої функції за призначенням і якщо вона ще має

початкову форму, таку яку набуває в результаті природного зношування, то їй забезпечена максимально можлива довговічність. Реалізація указаного принципу на практиці означає підвищення довговічності вузлів і деталей конструктивним методом без застосування спеціально зміцнюючих матеріалів або технологій. Встановленим фактом є те, що всі деталі, які працюють в умовах зношування спряженими деталями чи середовищем в процесі експлуатації набувають стабільної форми незалежно від початково-заданої.

В роботах [125-128] для збільшення площі контакту та зменшення втрат початкової форми у кінематичних парах, запропоновано надати деталям такої форми, яка б наближала їх до форм природного зносу.

Аналогічний підхід до визначення найбільш стійкої форми у глобоїдних черв'ячних передачах подано в роботах [129-130], де проводилися спостереження за підвищенням навантажувальних можливостей в процесі припрацювання. Відтворення форми природного зносу черв'яка покладено в основу його виготовлення.

Академіком Горячкіним В. П. відмічено, що в процесі експлуатації лемешів плугів, після проходження періоду припрацювання встановлюється стабільна форма профілей лез незалежно від їх початкового стану. Крім того, дослідженнями [131] виявлено, що стабілізація форми профілю кромки леза лемешів призводить, також, до зменшення тягового зусилля. Приведені в роботах [132-133] висновки підтверджують, що утворення стійкої форми природного зношування лемешів визиває не тільки зменшення інтенсивності їх зношування але й знижує енергетичні затрати на виконання процесу оранки.

Динаміка формування профілей лез грунтообробних машин при спрацюванні представлена в роботах [134-136] де встановлені форми природного зношування робочих органів в процесі експлуатації при їх зміцненні.

Наступне вивчення динаміки зміни геометричних форм лез грунтообробних знарядь при їх зміцненні представлено в роботах [134-136]. Завдання цих досліджень полягає в тому, щоб стабілізувати працездатну форму лез за рахунок локального нанесення необхідного зміцнюю чого матеріалу. Фактичне зміцнення в цьому випадку виступає як керуючий параметр для досягнення бажаної форми природного зношування лез. Стабілізація такої форми означає досягнення ефекту самозагострення, створення пилкоподібних лез або вирівнювання зношування по довжині крила лап культиваторів. В даних випадках як і в багатьох інших дослідженнях отримано оптимальну форму природного зношування, яка забезпечує мінімальні енерговитрати під час роботи та забезпечує стійкість формування профілів.

Основи підходу до аналізу процесу втрати форми деталей робочих органів подрібнюючи машин і пошуку працездатних їх форм при зміцненні для досягнення форм природного зношування закладено в роботі [11].

Першим, хто систематизував наукові підходи до вивчення формоутворювання деталей машин з позиції надання їм форм природного зношування, розподілу тиску, швидкості ковзання по поверхні тертя та інших факторів є Проников А. С. [137-139].

Проблемою пошуку форми природного зношування зубів борони та підвищення їх довговічності займалися Розенбаум А. Н. і Тенненбаум М. М. [140]. Математичні труднощі аналітичного опису зміни форми зубів змусили застосувати графоаналітичний метод, яким встановлена найкраща форма граней зубів борони у вигляді параболи.

Комплексний підхід, направлений на керування формами робочих поверхонь при зношуванні молотків зернодробарок розглянуто в роботах [11, 90, 98, 124, 141]. Запропоновані підходи ґрунтуються на раціональному взаємному доповненні конструктивних і технологічних методів підвищення довговічності деталей.

Значний вклад у вивчення природного зношування деталей з виявленням раціональної їх форми вніс Шульц В. В. [142-144]. Отримані результати досліджень засвідчують доцільність застосування деталей з такими формами, які найменше змінюють свої параметри в процесі експлуатації.

Таким чином, проведений аналітичний огляд конструктивних особливостей машин і їх сепаруючих робочих органів, умов експлуатації, причин і видів відмов, а також можливих шляхів підвищення довговічності решіт показав, що на сьогодні найбільш перспективним слід вважати конструктивні методи. Решета сепараторів, подрібнювачів чи дробарок представляють собою особливі деталі на 80% перфоровані отворами і тому застосування багатьох відомих конструктивних методів не представляється можливим, а пошук не дорогих, ефективних і технологічно доступних для серійного виробництва представляє собою актуальне науково-технічне завдання.

Постановка задач та обґрунтування напрямків дослідження

1. Проаналізувати існуючі конструктивні рішення сепаруючих робочих органів решітних зернодробарок, умови і особливості їх експлуатації.
2. Виявити причини втрати працездатності решітних сепаруючих робочих органів і визначити шляхи підвищення їх довговічності.
3. Встановити основні закономірності зміни форми отворів при їх зношуванні. Виявити граничні зношення і раціональні параметри величин зношення для застосування конструктивних методів підвищення довговічності.
4. Обґрунтувати форму отворів решіт мінімальної інтенсивності зношування. Довести необхідність науково-обгрунтованої організації

технічного обслуговування решіт для досягнення їх максимальної довговічності.

5. Оцінити техніко-економічну ефективність впровадження результатів досліджень у фермерське господарство.

РОЗДІЛ 2
ТЕОРІЯ ЗНОШУВАННЯ І ЗМІНИ ФОРМИ ОТВОРІВ СЕПАРУЮЧИХ РЕШІТ

2.1. Особливості умов експлуатації і зношування отворів сепаруючих решіт

Розділення зернової суміші на фракції може бути здійснено за різними ознаками її фізико-механічних властивостей. Найбільш широкого розповсюдження в практиці приготування кормів і в сортуванні зерна знайшло розділення суміші за геометричними параметрами за допомогою решіт. Решета представляють собою плоскі або циліндричні перфоровані поверхні. Від розмірів і форми отворів решіт залежить результуючий фракційний склад кінцевого продукту.

При всіх своїх відносно простих конструктивних формах і експлуатаційних перевагах решітні сепаратори мають суттєвий недолік – недостатню довговічність. Це обумовлює необхідність їх періодичних замін для продовження нормальної роботи машин. Особливо велика інтенсивність зношування спостерігається у решетах зернових дробарок. Причиною цього насамперед є відносно висока швидкість переміщення зерна в подрібнювальній камері і ударний характер циклічних навантажень при сутичках зернин з робочою поверхнею решета. Додатково зношуванню сприяє наявність в зерні абразивних частинок твердих оксидів (пил, пісок), які в невеликих об’ємах завжди присутні в зібраному врожаю зернових культур.

Попередній аналіз особливостей зношування робочих поверхонь решіт показав на нерівномірність його розподілу на окремих ділянках просіюючих отворів. Незалежно від загальної форми отворів, що використовують в тих чи інших решетах характерними для них є прямокутні спряження фронтальної

робочої поверхні з боковими, що і утворюють безпосередньо самі отвори. Схема отвору і зміна його форми при зношуванні показані на рис. 2.1.

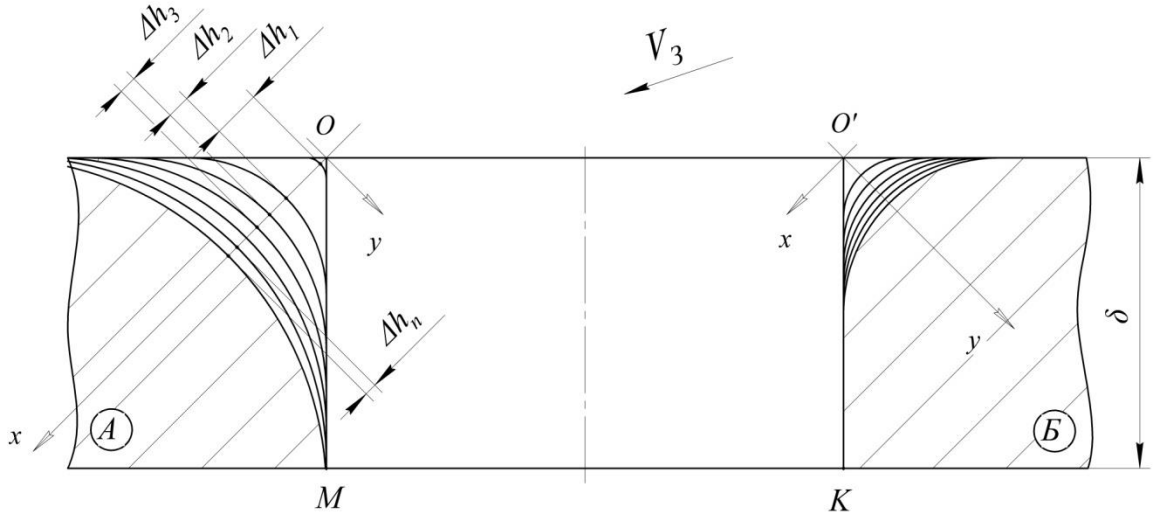


Рис. 2.1. Схема зношування і зміна форми отвору серійного решета зернової дробарки в перерізі: V_3 – напрямок руху зернової суміші; δ – товщина решета; Δh – величина зношування профілю в процесі експлуатації за один період наробітку.

Особливо вразливими при зношуванні є виступаюче прямокутне спряження робочих поверхонь отворів. Тут спостерігається найбільш інтенсивний процес зношування і швидка втрата початкової форми. Пояснити збільшене зношування матеріалу в спряженні можна насамперед виступаючою кутовою формою місця зношування. При такій формі матеріал деталі, що її утворює, знаходиться в особливих умовах концентрації навантажень на виступаючій частині. Крім того, кутова форма менш захищена від зношування і є більш вразливою для дії зовнішніх факторів, що його визначають. В необхідності розвантаження, кутова початкова форма відносно швидко міняється на округлу, тим самим розширюючи периметр взаємодії із зерновою масою. Динаміка поступової зміни форми отвору при зношуванні схематично показана на рис. 2.1.

Практикою експлуатації серійних решіт зернодробарок встановлено, що сторони отворів зношуються по-різному. Найбільше зношування за один і той же наробіток дробарки має сторона, що направлена назустріч потоку зерна (сторона *А*, рис. 2.1). Дещо менше зношування має сторона *Б*, яка знаходиться, якби, в «тіні» потоку зернової маси. Бокові сторони отвору мають практично однакові проміжні значення величин зношування і втрати початкової прямокутної форми.

Попереднє вивчення зміни форми профілю зношення отворів показало, що за рівні проміжки наробітку дробарки профілі зміщуються в глибину деталі на неоднакові відстані. Більш детальним аналізом наслідків зношування встановлено, що профілі переміщуються в залежності від наробітку практично рівносповільнено. Цей факт надає додаткову можливість отримання теоретичного опису процесу зношування просіюючих отворів решіт на основі розробки відповідних математичних моделей.

Граничним зношенням отворів слід вважати досягнення профілем нижньої точки первинної його форми. Після цього при подальшій експлуатації решіт розмір отворів починає збільшуватись, що порушує обумовлений зоотехнічними вимогами необхідний процес сепарації і отримання частинок зерна заданої фракції. В свою чергу недоподрібнений матеріал негативно впливає на кормову цінність суміші і подальший розвиток тварин.

2.2. Математичне моделювання зношування елементарної ділянки отворів серійного решета

Зношування металевих поверхонь отворів сепаруючого решета в потоці зернової маси обумовлене сумісною дією багатьох факторів:

- силового впливу від потоку зернової суміші;
- швидкісного, в наслідок переміщення суміші відносно решета;

- хімічного (вологість, вплив хімічних складових зруйнованого зерна);
- абразивного, при контакті поверхонь тертя з твердими частинками домішок.

Кожен з них вносить свій вклад в процес зношування, однак в залежності від зовнішніх умов, процес може протікати при домінуючій ролі якогось із них. Вважається, що насамперед, важливу роль відіграють тиск на поверхні тертя і відносна швидкість переміщення зернового матеріалу. Про це, опосередковано свідчить зміна геометричної форми отворів решета після тривалої їх роботи.

Основною вимогою до фізико-математичного моделювання зношування і зміни форми профілю отвору решета є адекватний, з достатньою точністю, опис його переміщення в глибину деталі. В разі встановлення основних закономірностей такого переміщення крім аналізу процесу, відкриються можливості визначення граничних величин зношування і раціональні напрямки в підвищенні довговічності сепаруючих решіт.

Припущеннями, прийнятими при моделюванні зношування і зміни форми отворів сепаруючих решіт є наступні:

1. Лінії профілю зношування з допустимим наближенням можуть бути описані частинами кола (Додоток Д).
2. Зношені площі суміжних дільниць профілів за рівні проміжки наробітку решета мають однакові величини.
3. Деякою існуючою різницею в товщині зношеної елементарної ділянки профілю можна знехтувати.

З урахування прийнятих припущень опис моделі зношування отворів представляється наступним чином. Профілі зношування є частинами кіл, які вписані в кут суміжних робочих поверхонь отвору. В результаті зношування профіль зміщується в глибину матеріалу деталі і через певний вибраний проміжок наробітку займає нове своє положення. Площа, що обмежена двома

утвореними профілями, дає можливість кількісної оцінки величини зносу. За величиною цих окремих площ, у вигляді відповідних скиб можна свідчити про розподіл і величини зношування поверхонь. Новим важливим фактом при попередньому аналізі особливостей зношування отворів є те, що площі зносу, які отримані за рівні проміжки, наробіток є практично однаковими по величині. Очевидно даний результат не є випадковим і підкреслює те, що робота, яка витрачається на зношування (втрату об'єму матеріалу), є на будь-якому етапі експлуатації решіт величиною постійною. Виходячи з цього, пояснюється нерівномірне розташування ліній профілів при аналізі зношування отворів. На початку експлуатації щільність їх розташування менша і поступово нарощується при збільшенні наробітку і зношуванні отворів. Вказана особливість дає можливість розглядати в моделі зношування отворів переміщення профілів зношування як нерівномірний рух центрів кіл, що описують ці профілі.

Таким чином описовою частиною моделі закладені основи формалізації зношування і зміни форми отворів для складання відповідної математичної моделі цього процесу.

Для математичного опису зношування виберемо нерухому систему координат *XOY* (рис. 2.2), зв'язану із самим отвором.

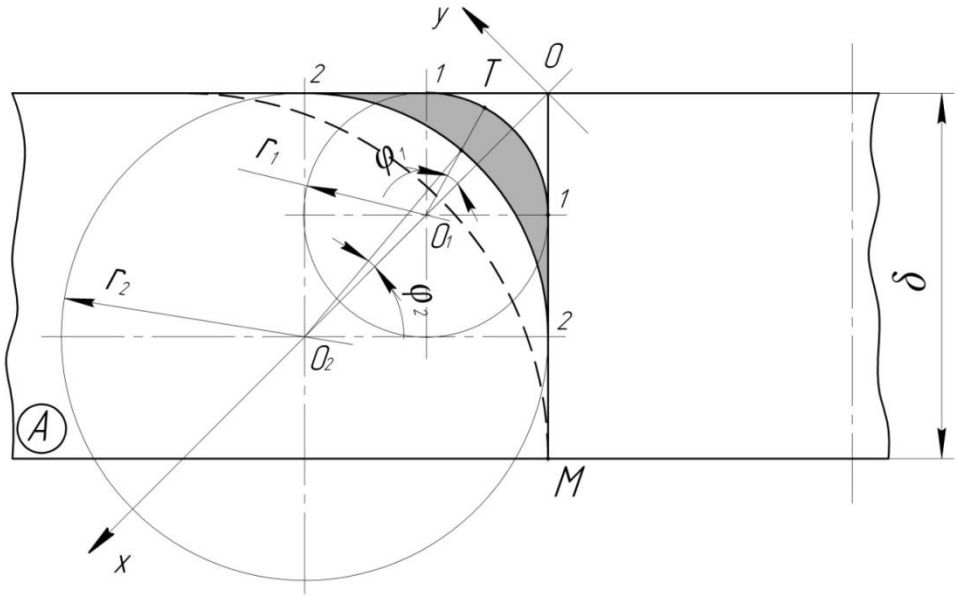


Рис. 2.2. Схема зношування і зміни форми отвору сепаруючого решета

Зношування отвору пропонується розглядати і описати математично, як переміщення кола вписаного в кут отвору. Причому, за мірою переміщення коло розвивається, набуваючи більших розмірів із збільшенням радіусу ($r_2 > r_1$).

Очевидно доцільно вважати граничним кінцевим зношенням сторони отвору досягнення лінією профілю точки *M*, коли прохідний діаметр отвору ще не збільшився (показано пунктиром).

Для побудови математичної моделі зміни форми отвору при зношуванні розглянута довільна точка *T* на початковому профілі 1-1. Координати цієї точки, як і будь-якої іншої точки профілю в залежності від кута φ, в загальній вибраній системі *XOY* можна записати наступним чином:

$$x_1 = x_{O1} - r_1 \cdot \cos\varphi_1;$$
$$y_1 = y_{O1} + r_1 \cdot \sin\varphi_1,$$

де x_{O1} – координата центру кола радіуса r_1;

r_1 – радіус кола, що описує початковий після припрацювання профіль зношування;

φ_1 – кут повороту радіуса кола для профілю 1-1.

Оскільки, переміщення центру кола відбувається вздовж осі *OX*, то $y_{O1} = 0,$ і система записується спрощено:

$$\begin{cases} x_1 = x_{O1} - r_1 \cdot \cos\varphi_1; \\ y_1 = r_1 \cdot \sin\varphi_1. \end{cases} \qquad (2.1)$$

Відповідно для другого кола більшого радіусу, яке утворилося внаслідок зношування отвору, система рівнянь, що визначає положення точок нового профілю, представляється наступним чином:

$$\begin{cases} x_2 = x_{O2} - r_2 \cdot \cos\varphi_2; \\ y_2 = r_2 \cdot \sin\varphi_2, \end{cases} \qquad (2.2)$$

де x_{O2} – координата центру кола радіуса r_2;

r_2 – радіус кола після деякого зношування профілю отвору;

φ_2 – кут повороту радіуса кола для профілю 2-2.

Результатом зношування отвору в перерізі, представленому на рис. 2.2., є втрата площі S_i тіла отвору, що знаходиться між початковим колом радіуса r_1 і утвореним колом радіусом r_2. Згідно вибраної системи координат і прийнятої схематичної побудови втрачена площа зношування симетрична відносно осі *OX*. Тому при її визначені достатньо розглянути тільки половину цієї площі. Схема для аналізу і розрахунку зношування сторони отвору представлена на рис. 2.3.

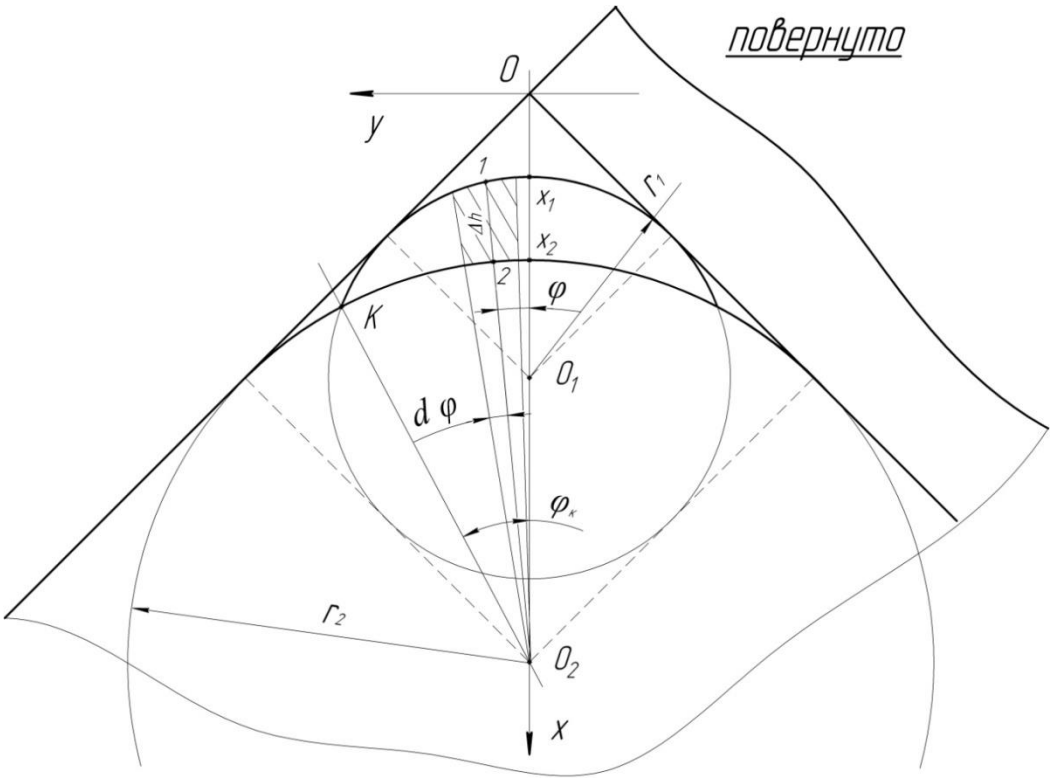


Рис. 2.3. Схема до визначення закономірностей динаміки зношування отворів решіт

Елементарна площадка зношування записується у вигляді добутку

$$dS_i = dl \cdot \Delta h, \tag{2.3}$$

де Δh – товщина зношеного шару між профілями отвору;

dl – елементарна дуга, яка з достатньою точністю може бути визначена як:

$$dl = r_2 \cdot d\varphi \tag{2.4}$$

Товщина зношеного шару може бути представлена через координати точки профілю. Для аналізу і встановлення її величини виділимо з рис. 2.3 окрему геометричну побудову, що представлена на рис. 2.4.

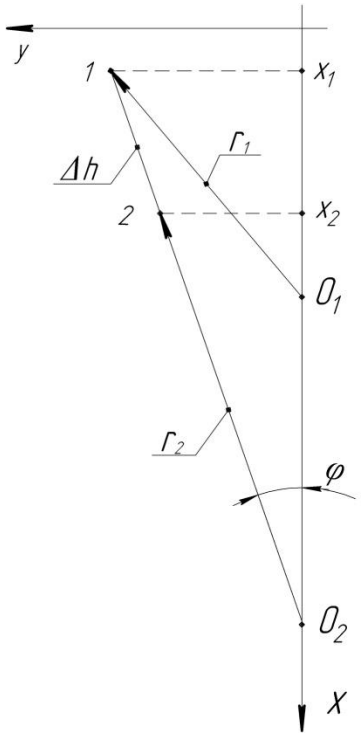


Рис. 2.4. Схема для визначення товщини зношеного шару Δh

З геометричних співвідношень сторін трикутників O_2, 1, x_1 і O_1, 1, x_1 видно, що:

$$\left(1 - x_1\right)^2 = r_1^2 - \left(x_{O1} - x_1\right)^2;$$
$$\left(1 - x_1\right)^2 = \left(r_2 + \Delta h\right)^2 - \left(x_{O2} - x_1\right)^2.$$

Ліві сторони рівностей однакові, тому можна записати:

$$r_1^2 - \left(x_{O1} - x_1\right)^2 = \left(r_2 + \Delta h\right)^2 - \left(x_{O2} - x_1\right)^2. \qquad (2.5)$$

Враховуємо, що:

$$x_{O1} = \sqrt{2} r_1;$$
$$x_1 = \sqrt{2} r_1 - r_1 \cdot \cos\varphi;$$
$$x_{O2} = \sqrt{2} r_2,$$

де φ – кут повороту елементарної площадки зношування.

Тоді, рівняння (2.5) після підстановки отриманих виразів можна записати так:

$$r_1^2 - \left(\sqrt{2} r_1 - \left(\sqrt{2} r_1 - r_1 \cdot \cos\varphi\right)\right)^2 = r_2^2 + 2r_2 \cdot \Delta h + \Delta h^2 - \left[\sqrt{2} r_2 - \left(\sqrt{2} r_1 - r_1 \cdot \cos\varphi\right)\right]^2.$$

Розкриваючи дужки, маємо:

$$r_1^2 - r_1^2 \cdot \cos^2\varphi =$$
$$= r_2^2 + 2r_2 \cdot \Delta h + \Delta h^2 - \left[2r_2^2 + 2\sqrt{2} r_2 \cdot \left(\sqrt{2} r_1 - r_1 \cdot \cos\varphi\right) - \left(\sqrt{2} r_1 - r_1 \cdot \cos\varphi\right)^2\right],$$

або

$$r_1^2 - r_1^2 \cdot \cos^2\varphi =$$
$$= r_2^2 + 2r_2 \cdot \Delta h + \Delta h^2 - 2r_2^2 - 2\sqrt{2} \cdot r_2 \cdot \sqrt{2} r_1 + 2\sqrt{2} \cdot r_2 \cdot r_1 \cdot \cos\varphi -$$
$$-\left[2r_1^2 - 2\sqrt{2} \cdot r_1 \cdot r_1 \cdot \cos\varphi + r_1^2 \cdot \cos^2\varphi\right].$$

Квадратом товщини зношення шару Δh за один крок елементарного переміщення профілю, як величиною другого порядку малості можна знехтувати. Тоді рівність після спрощень представляється наступним чином:

$$-r_1^2 - \cos\varphi\left[2\sqrt{2} \cdot r_2 \cdot r_1 + 2\sqrt{2} \cdot r_1^2\right] - r_2^2 + 2r_2^2 +$$
$$+2\sqrt{2} \cdot r_2 \cdot \sqrt{2} \cdot r_1 + 2r_1^2 = 2r_2 \cdot \Delta h,$$

або

$$r_2^2 + 4r_1 \cdot r_2 + r_1^2 - \cos\varphi \cdot \left(2\sqrt{2} \cdot r_2 \cdot r_1 + 2\sqrt{2} \cdot r_1^2\right) = 2r_2 \cdot \Delta h,$$

$$r_2^2 + 4r_1 \cdot r_2 + r_1^2 - 2\sqrt{2}\cos\varphi \cdot \left(r_2 \cdot r_1 + r_1^2\right) = 2r_2 \cdot \Delta h.$$

Звідки:

$$\Delta h = \frac{r_2^2 + 4r_1 \cdot r_2 + r_1^2 - 2\sqrt{2}\cos\varphi \cdot \left(r_2 \cdot r_1 + r_1^2\right)}{2r_2}. \qquad (2.6)$$

Представимо отримане рівняння (2.6) у наступному вигляді:

$$\Delta h = \frac{1}{2} r_2 + \frac{1}{2} \cdot \frac{r_1^2}{r_2} + 2r_1 - \frac{\sqrt{2}}{r_2} \cdot r_2 \cdot r_1 \cdot \cos\varphi - \frac{\sqrt{2}}{r_2} \cdot r_1^2 \cdot \cos\varphi. \qquad (2.7)$$

Підставимо значення товщини зношеного шару в початкове рівняння (2.3) для визначення зношеної елементарної ділянки отвору:

$$dS_i = \frac{1}{2} r_2^2 \cdot d\varphi + \frac{1}{2} r_1^2 \cdot d\varphi + 2r_1 r_2 \cdot d\varphi -$$
$$-\sqrt{2} r_2 r_1 \cdot \cos\varphi \cdot d\varphi - \sqrt{2} r_1^2 \cdot \cos\varphi \cdot d\varphi.$$

Звідки:

$$\int_0^S dS_i = \frac{1}{2} r_2^2 \cdot \int_{-\varphi_к}^0 d\varphi + \frac{1}{2} r_1^2 \cdot \int_{-\varphi_к}^0 d\varphi + 2r_1 r_2 \cdot \int_{-\varphi_к}^0 d\varphi -$$
$$-\sqrt{2} r_2 r_1 \cdot \int_{-\varphi_к}^0 \cos\varphi d\varphi - \sqrt{2} r_1^2 \cdot \cos\varphi \cdot d\varphi. \qquad (2.8)$$

де $\varphi_к$ – кінцеве значення кута повороту радіуса до точки К (рис. 2.3), яка є сумісною точкою перетину кіл, що розглядаються.

Необхідність у визначені кута $\varphi_к$ виникає для кінцевого положення радіуса при розрахунку площі зношення.

Внаслідок того, що точка K є спільною для обох кіл, маємо наступні рівності:

$$\begin{cases} x_1 = x_2; \\ y_1 = y_2. \end{cases} \tag{2.9}$$

Виходячи із системи рівнянь (2.1) і (2.2) і підставляючи значення координат в (2.9) з врахуванням, що у даному випадку $\varphi_2 = \varphi_к$ запишемо:

$$\begin{cases} x_{O1} - r_1 \cdot \cos\varphi_1 = x_{O2} - r_2 \cdot \cos\varphi_к; \\ r_1 \cdot \sin\varphi_1 = r_2 \cdot \sin\varphi_к. \end{cases} \tag{2.10}$$

Враховуючи, що $x_{O1} = \sqrt{2}r_1$ а $x_{O2} = \sqrt{2}r_2$, маємо:

$$\begin{cases} \sqrt{2}r_1 - r_1 \cdot \cos\varphi_1 = \sqrt{2}r_2 - r_2 \cdot \cos\varphi_к; \\ r_1 \cdot \sin\varphi_1 = r_2 \cdot \sin\varphi_к. \end{cases} \tag{2.11}$$

З другого рівняння системи (2.11) визначаємо кут φ_1:

$$\sin\varphi_1 = \frac{r_2 \cdot \sin\varphi_к}{r_1}.$$

Звідси $$\varphi_1 = arc\sin\left[\frac{r_2 \cdot \sin\varphi_к}{r_1}\right].$$

Підставляючи значення кута φ_1 в перше рівняння системи (2.11) в розгорнутому вигляді запишемо:

$$\sqrt{2}r_1 - r_1 \cdot \cos\left[arc\sin\left(\frac{r_2 \cdot \sin\varphi_к}{r_1}\right)\right] = \sqrt{2}r_2 - r_2 \cdot \cos\varphi_к. \tag{2.12}$$

Використовуючи відоме співвідношення для обернених тригонометричних функцій, маємо:

$$arc\sin\left(\frac{r_2\cdot\sin\varphi_к}{r_1}\right)=arc\cos\sqrt{1-\left(\frac{r_2\cdot\sin\varphi_к}{r_1}\right)^2}.$$

Враховуючи, що:

$$\cos\left[arc\cos\sqrt{1-\left(\frac{r_2\cdot\sin\varphi_к}{r_1}\right)^2}\right]=\sqrt{1-\left(\frac{r_2\cdot\sin\varphi_к}{r_1}\right)^2}.$$

Повертаючись до рівняння (2.12) і підставляючи значення оберненої функції маємо:

$$\sqrt{2}r_1-r_1\sqrt{1-\left(\frac{r_2\cdot\sin\varphi_к}{r_1}\right)^2}=\sqrt{2}r_2-r_2\cdot\cos\varphi_к.$$

Виконуємо наступні алгебраїчні перетворення :

$$\sqrt{2}r_1-\sqrt{2}r_2+r_2\cdot\cos\varphi_к=r_1\sqrt{1-\left(\frac{r_2\cdot\sin\varphi_к}{r_1}\right)^2},$$

$$\left(\sqrt{2}\left(r_1-r_2\right)+r_2\cdot\cos\varphi_к\right)^2=\left(r_1\sqrt{1-\left(\frac{r_2\cdot\sin\varphi_к}{r_1}\right)^2}\right)^2,$$

$$2\cdot\left(r_1-r_2\right)^2+2\sqrt{2}\left(r_1-r_2\right)\cdot r_2\cdot\cos\varphi_к+r_2^2\cdot\cos^2\varphi_к=$$
$$=r_1^2\cdot\left(1-\left(\frac{r_2\cdot\sin\varphi_к}{r_1}\right)^2\right). \qquad (2.13)$$

Розвязання отриманого трансцендентного рівняння відносно невідомого кута $\varphi_к$ проведено за допомогою пакету прикладної обчислювальної програми MathCAD. При заданих початкових умовах $r_1=0{,}1$ *мм;* та $r_2=0{,}11$ *мм* визначено кінцеве значення кута повороту $\varphi_к$

радіуса до точки К, яка є спільною у перетині кіл. Результат проведених розрахунків представлений в додатку Е та зображено графічно на рис. 2.5, з якого видно, що кут $\varphi_к \approx -42,3°$.

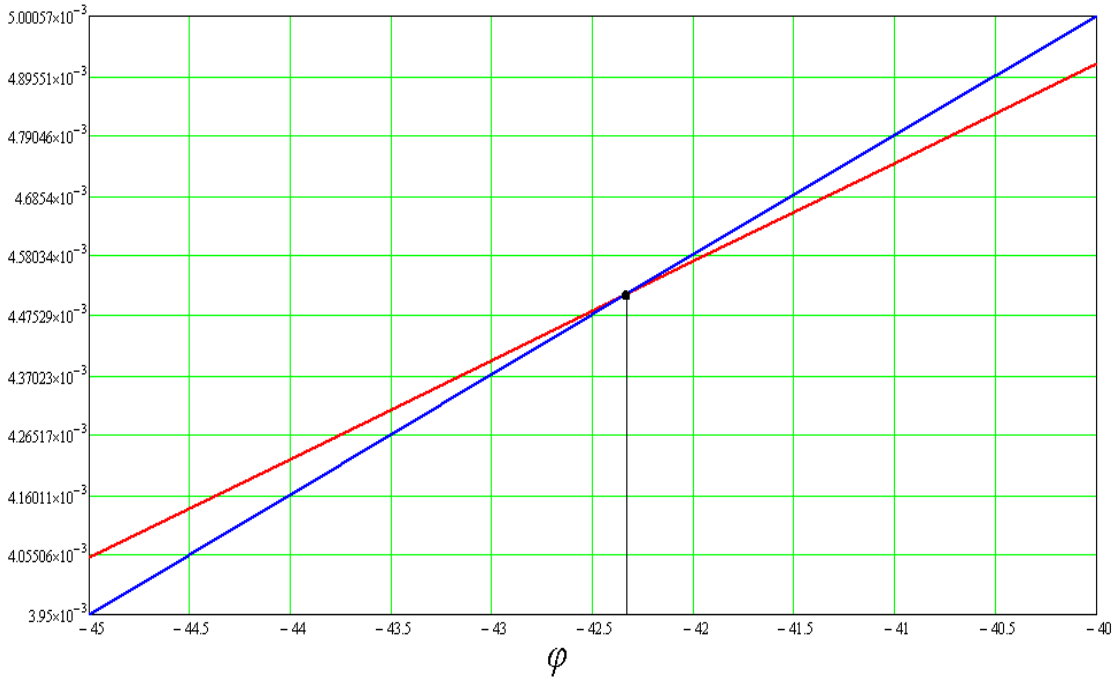


Рис. 2.5. Визначення положення кута $\varphi_к$:

— $2\cdot(r_1-r_2)^2+2\sqrt{2}(r_1-r_2)\cdot r_2\cdot\cos\varphi_к+r_2^2\cdot\cos^2\varphi_к$. — $r_1^2\cdot\left(1-\left(\frac{r_2\cdot\sin\varphi_к}{r_1}\right)^2\right)$;

Гранична величина кута повороту $\varphi_к$ радіуса r_2 однозначно визначає положення точки *К*. Однак доцільно зауважити, що встановлення площі зношування за цією точкою перетину кіл вносить деяку похибку у дійсну величину площі зношування. Випадає з розрахунку невелика крайова ділянка площі зношення, що знаходиться за межами кіл між дугами профілів від точки *К* до верхньої зовнішньої робочої поверхні решета. Для компенсації цієї незначної похибки і враховуючи відносну складність визначення кута $\varphi_к$, для практичних цілей з достатньою точністю встановлення площі

зношування можна прийняти за кінцеве положення зношеного профілю точку дотику, якій відповідає кут $\varphi = \varphi_к = -\frac{\pi}{4}$.

Повертаючись до рівняння визначення площі зношування (2.8) і інтегруючи його, встановлено залежність зміни елементарної ділянки зношування від кута повороту радіуса:

$$S_i = \frac{r_2^2}{2}\varphi + \frac{r_1^2}{2}\varphi + 2r_1 \cdot r_2\,\varphi - \sqrt{2}r_2 r_1 \cdot \sin\varphi - \sqrt{2}r_1^2 \cdot \sin\varphi,$$

$$S_i = \left(\frac{r_2^2}{2} + \frac{r_1^2}{2} + 2r_1 \cdot r_2\right)\varphi - \sqrt{2}r_2 \cdot r_1 \cdot \sin\varphi - \sqrt{2}r_1^2 \cdot \sin\varphi. \qquad (2.14)$$

Встановлюючи межі інтегрування маємо:

$$S_i = \frac{1}{2}r_2^2\varphi\Big|_{-\varphi_к}^{0} + \frac{1}{2}r_1^2\varphi\Big|_{-\varphi_к}^{0} + 2r_1 \cdot r_2\,\varphi\Big|_{-\varphi_к}^{0} - \sqrt{2}r_2 \cdot r_1 \sin\varphi\Big|_{-\varphi_к}^{0} - \sqrt{2}r_1^2 \sin\varphi\Big|_{-\varphi_к}^{0},$$

або

$$S_i = \frac{1}{2}r_2^2\varphi_к + \frac{1}{2}r_1^2\varphi_к + 2r_1 \cdot r_2\,\varphi_к - \sqrt{2}r_2 \cdot r_1 \sin\varphi_к - \sqrt{2}r_1^2 \sin\varphi_к.$$

Звідки:

$$S_i = \frac{\pi}{8}r_2^2 + \frac{\pi}{8}r_1^2 + \frac{\pi}{2}r_1\,r_2 - r_1\,r_2 - r_1^2,$$

$$S_i = \frac{\pi}{8}\cdot\left(r_2^2 + r_1^2\right) + \frac{\pi}{2}r_1\,r_2 - r_1\,r_2 - r_1^2. \qquad (2.15)$$

Як вказувалося вище процес зношування розглянуто на ділянки кута повороту $\frac{\pi}{4} \geq \varphi \geq 0$. Отриманий результат правомірний і для симетричної суміжної ділянки. Тому сумарну площу необхідно подвоювати:

$$S_i = \frac{\pi}{4}\cdot\left(r_2^2 + r_1^2\right) + \pi r_1\,r_2 - 2r_1\,r_2 - 2r_1^2. \qquad (2.16)$$

Науковий і практичний інтерес представляє виявлення основних закономірностей протікання процесу зношування отворів решіт і втрати їх початкової форми. Для встановлення цих закономірностей повернемося до виразу, що визначає зв'язок між зношуванням на елементарному кроці його здійснення і переміщенням профілю вглиб матеріалу.

Попередніми спостереженнями зміни форми отвору при зношуванні отримані дані про те, що за рівні проміжки часу наробітку профілі зміщуються нерівномірно. На початку зношування це переміщення значно більше і поступово знижується по мірі зростання часу експлуатації решіт. Виходячи із визначення елементарної площі зношування (2.3), підставляючи значення елементарної дуги (2.4) маємо:

$$dS_i = r_2 \cdot \Delta h \cdot d\varphi. \tag{2.17}$$

Переміщення профілю виражене через товщину зношеного шару Δh і залежить не тільки від положення елементарної ділянки зношення на профілі, тобто від кута φ, але й від часу експлуатації решета. В функції кута повороту радіуса, вплив цього переміщення встановлено попереднім дослідженням. Вплив часу на зміщення профілю представляє не тільки науковий але й практичний інтерес для встановлення і оптимізації довговічності решіт.

Розглядаючи переміщення профілю як рівносповільнене і враховуючи умову зміни кута повороту φ від 0° до $-\frac{\pi}{4}$ запишемо вираз (2.17) в наступному вигляді:

$$S_i = \frac{\pi}{4} \cdot r_2 \cdot \Delta h. \tag{2.18}$$

Шлях, що проходить профіль отвору у рівносповільненому переміщенні при зношуванні згідно відомої формули може бути представлений наступним чином:

$$\Delta h = V_0 t - \frac{at^2}{2}, \tag{2.19}$$

де V_0 – початкова (після припрацювання) швидкість зношування (переміщення) профілю по нормалі до поверхні тертя;

a – сповільнення в переміщенні профілю отвору при зношуванні;

t – час зношування.

Підставляючи значення переміщення з (2.19) в початкову формулу визначення елементу зношення (2.18) маємо:

$$S_i = \frac{\pi}{4} \cdot r_2 \cdot \left(V_0 t - \frac{at^2}{2} \right). \tag{2.20}$$

Для визначення швидкості зміни зношування елементарної ділянки отвору продиференціюємо обидві частини рівності (2.20):

$$V_i = \frac{dS_i}{dt} = r_2 \frac{\pi}{4} \cdot \left(V_0 - at \right). \tag{2.21}$$

Таким чином встановлено лінійний зв'язок між швидкістю переміщення профілю і швидкістю зміни площі зношування на елементарній ділянці отвору. Графічно він представлений на рис. 2.6.

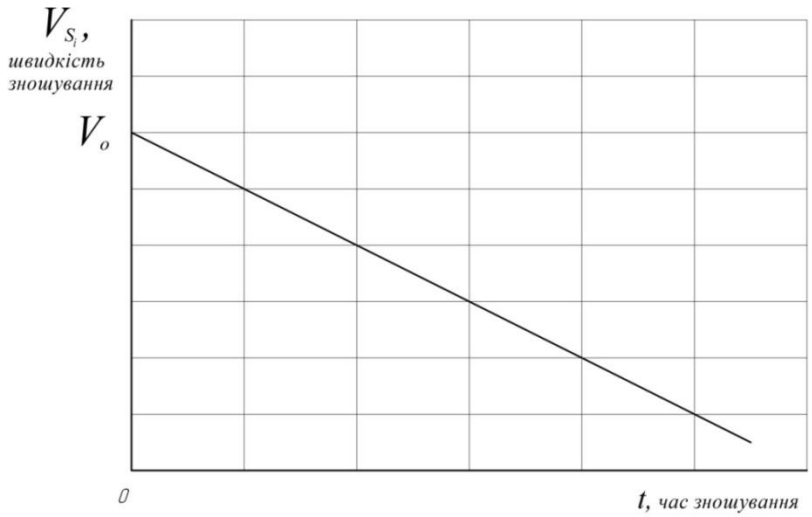


Рис. 2.6. Залежність швидкості зношування елементарної ділянки отвору решета від напрацювання

Аналіз отриманого результату показує, що із збільшенням часу напрацювання, швидкість зношування поступово лінійно зменшується. Цей факт ґрунтований на експлуатаційних даних роботи решіт і представленому теоретичному дослідженні, вказує на поступову і неухильну стабілізацію профілю отвору. Початкова швидкість зношування профілю, який сформований після завершення періоду припрацювання і набув округлу форму, поступово зменшується, проявляючи признаки стабілізації і переходу до форми природного зношування.

Доповнюючим фактором в стабілізації профілю може бути встановлення величини сповільнення зміни площі зношування отвору. Сповільнення в зміні площі зношування може бути визначено шляхом диференціювання виразу (2.21):

$$W_i = \frac{dV_i}{dt} = -\frac{\pi}{4} \cdot r_2 \cdot a. \qquad (2.22)$$

Від'ємний результат підкреслює, що процес проходить із сповільненням, тобто в напрямку стабілізації. Величина сповільнення в зношуванні отвору пропорційна переміщенню профілю, що природно підкреслює фізичну сутність розглянутого процесу.

2.3. Накопичувальний процес зношування отворів

При розгляді зношування елементарної ділянки профілю отвору (розділ 2.2) встановлені основні закономірності і характеристики протікання цього процесу. Однак для узагальнення картини зміни форми отворів і виявлення тенденцій їх утворення під дією потоку зернової маси виникає необхідність в розробці загальної моделі зношування.

Рівносповільнене переміщення профілю отвору внаслідок зношування у глибину деталі (вздовж осі *OX,* рис. 2.3) представляється наступною нерівністю:

$$\Delta x_1 > \Delta x_2 > \Delta x_3 > .... > \Delta x_i .... > \Delta x_n,$$

де Δx_i – відстань по осі *OX* між суміжними профілями зношування;

i – поточне значення члена нерівності.

Відстані між суміжними профілями виражаються через складування переміщень $\Delta h_i = \Delta x_i$, що проходять ці профілі. Тому для послідовності переміщень профілів можна записати:

$$\left.\begin{array}{ll}
1) & \text{шлях на першому кроці } \Delta h_1; \\
2) & \text{шлях на другому кроці } \Delta h_2 = \Delta h_1 - \Delta h_a; \\
3) & \text{шлях на третьому кроці } \Delta h_3 = \Delta h_2 - \Delta h_a = \Delta h_1 - 2\Delta h_a; \\
4) & \text{шлях на четвертому кроці } \Delta h_4 = \Delta h_3 - \Delta h_a = \Delta h_1 - 3\Delta h_a; \\
\multicolumn{2}{l}{\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots} \\
n) & \text{на } n\text{-му кроці } \Delta h_n = \Delta h_{n-1} - \Delta h_a = \Delta h_1 - (n-1)\Delta h_a,
\end{array}\right\} \quad (2.23)$$

де Δh_a – втрата частини шляху профілю в внаслідок рівносповільненого його переміщення.

В загальному випадку для $i^{го}$ відрізку шляху маємо:

$$\Delta h_i = \Delta h_{(i-1)} - \Delta h_a = \Delta h_1 - (i-1)\Delta h_a, \quad (2.24)$$

де $i = 1, 2, 3.....$ – поточне значення складової суми.

Графічно процес накопичення пошкоджень (зношування) отворів представлено на рис. 2.7. Графік побудовано, виходячи з попередніх даних особливостей зношування отворів в експлуатації решіт і результатів теоретичних досліджень представлених в розділі 2.2. На горизонтальній осі відкладені відрізки рівносповільнених переміщень профілів Δh_i. Кожному

наступному відрізку переміщення профілю відповідають рівні за величиною площі зношування отвору S_i.

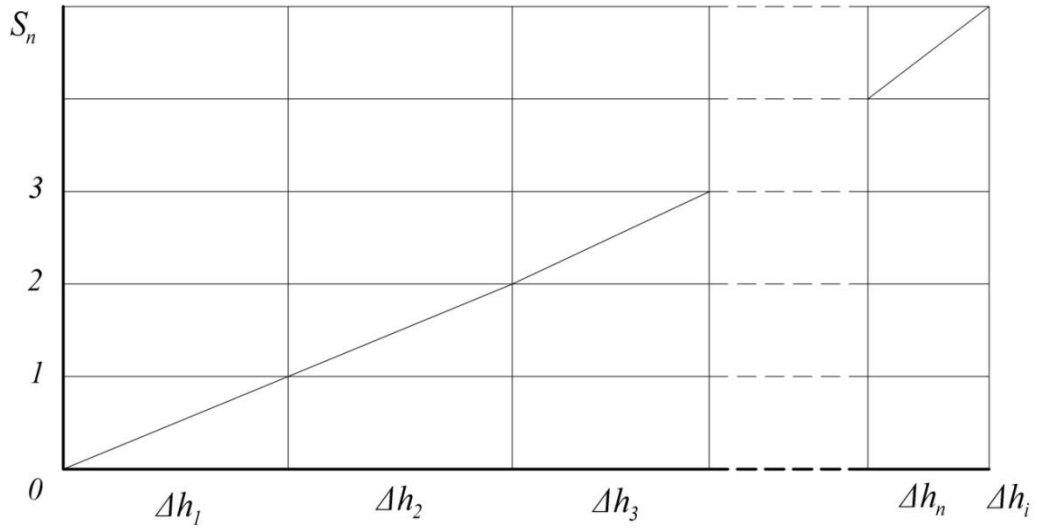


Рис. 2.7. Накопичення пошкоджень (величин зношення) отворів сепаруючого решета

Таким чином загальна величина зношування S дорівнює сумі окремих величин зношування S_i, що відбулися за n кроків переміщення профілю

$$S = \sum_{i=1}^{n} S_i .$$

При $S_i = const$, що спостерігається в практиці експлуатації решіт, загальна величина зношування дорівнює:

$$S = n \cdot S_i .$$

Самі переміщення профілю вздовж осі OX також накопичуються. Тоді, виходячи з (2.24) для їх суми можна записати:

$$\sum_{i=1}^{n} \Delta h_i = \sum_{i=1}^{n} \left[\Delta h_1 - (i-1)\,\Delta h_a \right]. \qquad (2.25)$$

Розкриваючи суму і виконуючи алгебраїчні перетворення, маємо:

$$\sum_{i=1}^{n} \Delta h_i = n \cdot \Delta h_1 - \Delta h_a \cdot \sum_{i=1}^{n-1} i. \qquad (2.26)$$

Відповідно до поставленого завдання, кінцева кількість кроків може бути різною. Так, кількість кроків (ітерацій при розрахунках) при визначенні зношування сторони (*А*) (рис. 2.2) до кінцевого свого значення (досягнення профілем точки *М*) береться рівною $n = n_M$. Якщо ставиться завдання визначення кількості кроків до своєчасного перевертання решета на нову менш зношену робочу сторону (сторона *Б*), то кількість кроків буде дорівнювати $n = n_{пер}$.

При досягненні отвором решета граничного зношування (точки М) подальша його робота недопустима, так як збільшується розмір просіюючого діаметру, що унеможливлює його нормальне функціонування як сепаруючого елемента.

Виходячи із геометричних побудов (рис. 2.2) допустимий шлях переміщення профілю обмежений товщиною решета δ. Тоді кількість кроків (ітерацій) визначається величиною самого кроку, а також умовою, коли сума (2.26) не перевищує $\left(\sqrt{2}-1\right)\delta$.

$$h_M = n_M \cdot \Delta h_1 - \Delta h_a \cdot \sum_{i=1}^{n_M - 1} i \le \left(\sqrt{2}-1\right)\delta. \qquad (2.27)$$

При досягненні поточним значенням (*i*) необхідної кількості кроків $i = n_M$ ведуча, активна при зношуванні сторона отвору (сторона *А*), досягає свого граничного стану і подальша експлуатація решета стає неможливою. Враховуючи, що протилежна сторона (сторона *Б*) отвору також зношується, але з меншою інтенсивністю ніж сторона *А*, постає завдання своєчасного перевертання решета стороною *Б* вперед для того, щоб вони сумісно і

одночасно досягли свого граничного значення при максимально можливому ресурсі.

2.4. Оптимізація ресурсу серійного решета при його реверсному використанні

Перевертання деталей на нову або менш зношену сторону для подальшої експлуатації є одним із ефективних конструктивних методів підвищення їх загальної довговічності (повного ресурсу). Такий підхід для підвищення довговічності сепаруючих решіт виправданий тим, що грані отворів зношуються з різною інтенсивністю. Тому для подовження строку експлуатації доцільно своєчасно здійснити перевертання решіт, таким чином, щоб знос протилежних сторін отворів закінчився одночасно.

Задача даного дослідження зводиться до визначення моменту своєчасного перевертання решіт для досягнення максимального їх ресурсу. Крім того, в наслідок виконання цієї операції доцільно і важливо встановити степінь можливого підвищення довговічності решіт.

Загальний накопичувальний процес зношування і зміни форми отворів описується рівнянням (2.26). Відповідно до сторони (*A)* (рис. 2.2) цей процес представляється наступним чином:

$$h_A = \sum_{i=1}^{n_M} \Delta h_{iA} = n_M \cdot \Delta h_{1A} - \Delta h_{aA} \cdot \sum_{i=1}^{n_M - 1} i, \qquad (2.28)$$

де Δh_{iA}; Δh_{1A}; Δh_{aA} – параметри зношування сторони *A* отвору.

Загальна кількість кроків n_M для досягнення профілем отвору на стороні (*A)* кінцевої точки *M* може представлятися показником довговічності серійного решета без використання операції його перевертання.

Сторона (*Б)* отвору зношується і міняє форму отвору згідно такої ж встановленої закономірності (2.26) накопичувального процесу, але із своїми параметрами $\Delta h_{iБ}$; $\Delta h_{1Б}$; $\Delta h_{aБ}$.

$$h_{Б} = \sum_{i=1}^{n} \Delta h_{iБ} = n \cdot \Delta h_{1Б} - \Delta h_{aБ} \cdot \sum_{i=1}^{n-1} i. \qquad (2.29)$$

Своєчасність і доцільність перевертання решета для підвищення його довговічності до максимально можливої, визначається таким важливим параметром, як кількість кроків до перевертання $n_{пер}$. Виходячи з того, що профілі сторін (*А* і *Б)* починають свою роботу одночасно і до моменту перевертання напрацьовують однакову кількість кроків при різних пройдених шляхах профілів, то можна записати:

Сторона *А:* $$h_{Апер} = n_{пер} \cdot \Delta h_{1А} - \Delta h_{aА} \cdot \sum_{i=1}^{n_{пер}-1} i, \qquad (2.30)$$

Сторона *Б:* $$h_{Бпер} = n_{пер} \cdot \Delta h_{1Б} - \Delta h_{aБ} \cdot \sum_{i=1}^{n_{пер}-1} i. \qquad (2.31)$$

Внаслідок перевертання менш зношена сторона (*Б)* займає положення на стороні (*А)* і продовжує зношуватися за параметрами $\Delta h_{1А}$; $\Delta h_{aА}$ сторони (*А)*. І навпаки, більш зношена сторона (*А)* переходить на місце сторони (*Б)* і продовжує зношуватися за параметрами $\Delta h_{1Б}$; $\Delta h_{aБ}$ сторони (*Б)*. Такий переворот (реверс) збільшує шлях зношування на стороні (*А)*, а на стороні (*Б)* навпаки скорочує. Але, оскільки сторона (*Б)* зношується повільніше ніж сторона (*А)*, то постає питання такого своєчасного перевертання решета, щоб зношування сторін закінчувалися одночасно. В такому комбінованому русі сторін отвору при зношуванні для кожної з них можна виділити по дві ділянки: зношування до перевертання, що описуються рівняннями (2.30; 2.31) і зношуванням після перевертання з урахуванням

того, що на кожній з ділянок діють свої параметри зношування. Різниця між переміщеннями профілів сторони (*А)* і сторони (*Б)* і визначає додатковий шлях, що призводить до підвищення довговічності решета (рис. 2.8).

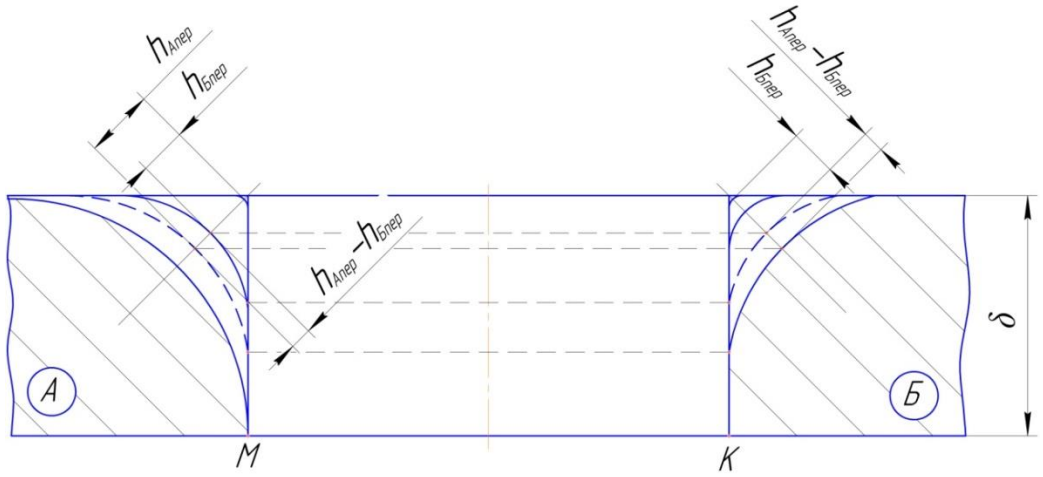


Рис. 2.8. Схема зношування і переміщення профілів при перевертанні серійного решета

Загальний шлях переміщення профілю отвору сторони (*А)* при перевертанні дорівнює наступній сумі:

$$h_A(i)\Big|_{i=1}^{n_{пер}} + \left(h_{Апер} - h_{Бпер}\right) + h_A(i)\Big|_{n_{пер}}^{n_M}, \qquad (2.32)$$

Перша і остання складові виразу утворюють повне переміщення профілю сторони (*А*) до кінцевої точки зношування *М* і їх сума може бути замінена максимально можливою величиною переміщення $\left(\sqrt{2}-1\right)\delta$. Середня складова $\left(h_{Апер} - h_{Бпер}\right)$ представляє собою добавку до повного переміщення у зв'язку з виконанням операції перевертання решета на нову грань для подальшої експлуатації.

Сторона (*Б)* зношується по-іншому. Перший період після припрацювання утворюється переміщенням профілю до моменту (кроку)

перевертання $h_{Бпер}$. При перевертанні випадає частина шляху, що дорівнює відрізку $h_{Апер} - h_{Бпер}$. Другий етап роботи решета на цій стороні починається від $h_{Апер}$ до досягнення профілем кінцевої точки *К* (рис. 2.8). Тоді, сумуючи відрізки переміщень профілів зношування на стороні *Б* можна записати:

$$h_Б(i)\Big|_{i=1}^{n_{пер}} + h_Б(i)\Big|_{n_x}^{n_K}, \tag{2.33}$$

де n_x – кількість кроків, що необхідно пройти стороні (*Б)* до досягнення її профілем такого ж стану (шляху переміщення), який отримує сторона (*А)* на момент перевертання решета.

Номер кроку з якого починається другий етап роботи на стороні (*Б)* (n_x) може бути визначений з моделі зношування цієї сторони (2.29) при умові, що шлях переміщення профілю буде дорівнювати $h_{Апер}$. Тоді можна записати:

$$n_x \cdot \Delta h_{1Б} - \Delta h_{аБ} \cdot \sum_{i=1}^{n_x - 1} i = h_{Апер}. \tag{2.34}$$

Умовою оптимізації напрацювання решета на відмову є досягнення максимального строку його експлуатації. Це можливо при максимізації сумарного шляху переміщення профілів сторін і одночасного завершення роботи з досягненням профільних кривих граничних точок зношування *М* і *К*. Тоді виходячи з (2.32) для сторони (*А)* і (2.33) для сторони (*Б)* запишемо:

$$h_A(i)\Big|_{i=1}^{n_{пер}} + \left(h_{Апер} - h_{Бпер}\right) + h_A(i)\Big|_{i=n_{пер}}^{n_M} + h_Б(i)\Big|_{i=1}^{n_{пер}} + h_Б(i)\Big|_{i=n_x}^{n_K} \to H_{\max} \tag{2.35}$$

Оскільки, загальний шлях по бісектрисах кутів є центрами кіл, які утворюють робочі поверхні отвору, не можуть бути більше $H_{\max} = 2\delta\left(\sqrt{2}-1\right)$, то враховуючи (2.29 і 2.31) після спрощень можна записати:

$$h_A(i)\Big|_{i=1}^{n_M} + h_{Anep} + h_Б(i)\Big|_{n_x}^{n_K} \to 2\delta\left(\sqrt{2}-1\right). \tag{2.36}$$

Таким чином задача з встановлення моменту перевертання решета звелась до виявлення необхідної кількості кроків при прямуванні загального шляху зношення сторін до свого максимального значення. Підставляючи значення складових в (2.36) маємо:

$$\begin{aligned} &n_M \cdot \Delta h_{1A} - \Delta h_{aA} \cdot \sum_{i=1}^{n_M-1} i + n_{пер} \cdot \Delta h_{1A} - \\ &-\Delta h_{aA} \cdot \sum_{i=1}^{n_{пер}-1} i + \left(n_K - n_X\right) \cdot \Delta h_{1Б} - \Delta h_{aБ} \cdot \sum_{i=n_x}^{n_K-1} i \to 2\delta\left(\sqrt{2}-1\right). \end{aligned} \tag{2.37}$$

Модель зношування (переміщення) профілів сторін отвору представлено графічно на рис. 2.9.

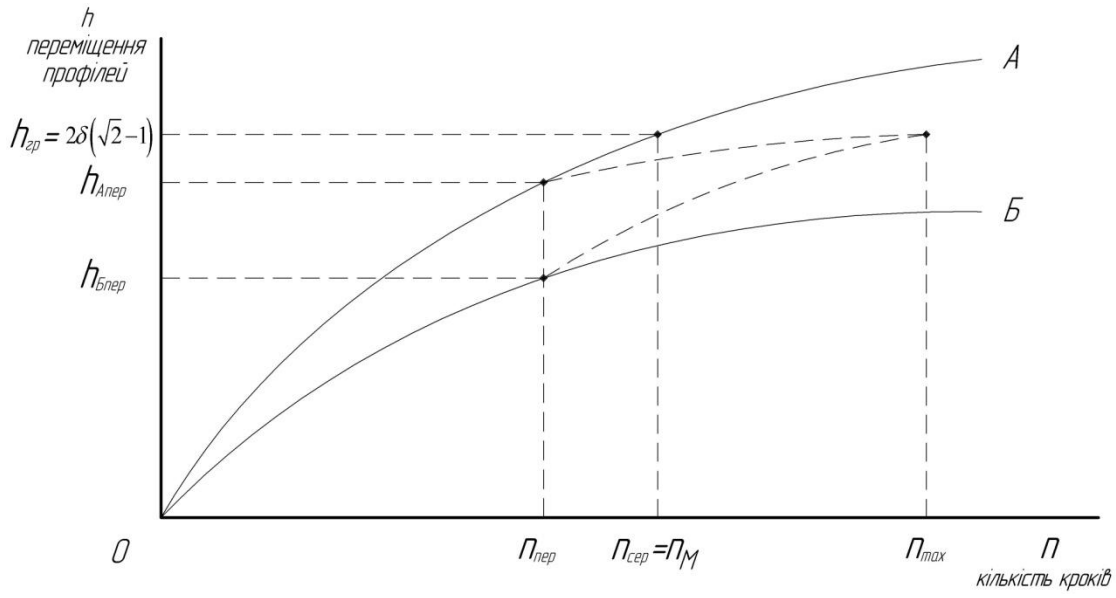


Рис. 2.9. Динаміка змін переміщення профілів отвору протилежних сторін при перевертанні решіт ($n_{сер} = n_M$ – кількість кроків напрацювань серійного решета без перевертання; n_{max} – максимальна кількість кроків напрацювань серійного решета з перевертанням).

Кількість кроків (ітерацій) до перевертання $n_{пер}$ визначається методом послідовних наближень, при якій виконується рівність або досягається мінімальна різниця між лівою і правою частинами рівняння (2.37).

Отримане значення кількості кроків $n_{пер}$ є оптимальним для виконання операції перевертання решета. На підставі цього, встановлюється додатковий відрізок до шляху переміщення профілю за стороною (*А)*, який і виявляє степінь можливого підвищення довговічності решета. Цей додатковий відрізок шляху знаходиться, як різниця між шляхом до перевертання, що проходить сторона *А* $\left(h_{Апер}\right)$ і шляхом, що проходить до перевертання сторона *Б* $\left(h_{Бпер}\right)$ (рис. 2.8), але при переміщенні профілю за стороною (*А)* з його параметрами руху. Величина відрізків шляхів розраховується згідно рівнянь (2.30; 2.31). Відповідно кількість додаткових кроків знаходиться наступним чином:

$$h_{Апер} - h_{Бпер} = n_{пер} \cdot \Delta h_{1A} - \Delta h_{aA} \cdot \sum_{i=1}^{n_{пер}-1} i - n_y \cdot \Delta h_{1A} + \Delta h_{aA} \cdot \sum_{i=1}^{n_y-1} i, \quad (2.38)$$

де n_y – кількість кроків в русі профілю за стороною (*А)*, що відповідає переміщенню профілю сторони (*Б)* на момент перевертання решета.

Кількість кроків n_y в переміщенні профілю сторони (*А*) знаходиться з умови, що основні дві складові правої частини рівності (2.38) будуть дорівнювати $h_{Бпер}$. Тобто:

$$n_y \cdot \Delta h_{1A} - \Delta h_{aA} \cdot \sum_{i=1}^{n_y-1} i = h_{Бпер} \cdot . \quad (2.39)$$

Кількість кроків до перевертання $n_{пер}$ знаходиться згідно отриманого раніше рівняння (2.37), а кількість кроків n_y із рівняння (2.39).

Кількість додаткових кроків в зношуванні $n_д$ представляє собою виграш в довговічності решета за рахунок його перевертання.

$$n_д = n_{пер} - n_у.$$

Тоді степінь підвищення довговічності за кількістю кроків до повного зношування решіт представляється відношенням:

$$G_n = \frac{n_{сер} + n_д}{n_{сер}} \cdot 100\%. \qquad (2.40)$$

Причому, згідно поставленої в дослідженні задачі повне зношування протилежних сторін отворів відбудеться одночасно чим забезпечиться максимально можливий ресурс серійних решіт.

В результаті проведеного дослідження, отримано два важливих параметри для реалізації підвищення довговічності серійних решіт. Встановлено оптимальне значення кількості кроків в зношені до моменту виконання операції перевертання. Воно складає $n_{пер} / n_c$ частину від загального зношення, яке може бути визначено в експериментальному дослідженні і виміряно звичайними засобами лінійних вимірювань, або оцінено візуально при поточному контролі стану сепаруючого робочого органу. Другим параметром є степінь можливого підвищення загальної довговічності решета конструктивним методом за рахунок своєчасного перевертання решета з метою одночасного завершення роботи сторін отворів до граничного їх стану (2.40). Отримана максимальна довговічність серійного решета може бути покладена в нормування загального ресурсу серійних решіт.

2.5. Обґрунтування нової форми отворів сепаруючих решіт

Попередніми дослідженнями виявлено, що процес зношування отворів серійних решіт носить нерівномірний характер з поступовим зменшенням швидкості переміщення профілів. При цьому швидкість зношування елементарної ділянки профілю, як показник втрати його форми змінюється за лінійним законом (рис. 2.7). Така ж, лінійна закономірність зберігається для всього отвору протягом наробітку до відмови, як накопичувальний безперервний процес зношування решіт. Із збільшенням наробітку швидкість зношування поступово зменшується, а отвір набуває тороїдальної форми. Просіюючі властивості таких отворів не втрачають своїх функціональних можливостей оскільки їх прохідний діаметр до досягнення граничного зношування не змінюється. Таким чином, в процесі експлуатації просіюючий отвір отримує нову форму, для якої характерна менша швидкість зношування без втрати основної функції розділення зернової суміші на фракції.

Вивчення особливостей зношування отворів вказує на доцільність надання їм початкової конструктивної геометрії близької до форми природного зношування. Очевидно такою формою може бути та, що утворюється при завершені експлуатації звичайного серійного решета коли отвір, що зношується, досягає граничного значення, а швидкість переміщення профілю прямує до мінімального свого значення $V_{\min}$.

Схематичне зображення такого конструктивного рішення форми просіюючого отвору представлено на рис. 2.10. Отвір відрізняється тим, що в ньому відсутні гострі кути, утворені робочою і циліндричною поверхнями, як це було у серійного решета. Замість цього, при виготовлені решіт передбачено переорієнтація матеріалу для формування тороїдальної поверхні отворів, яка є плавним спряженням між верхньою робочою і циліндричною поверхнями. Утворений об’єм матеріалу у нижній частині отвору спрямований на створення запасу на зношування. В результаті на тильній

поверхні решета формується виступаючі ділянки навколо отворів, які і забезпечують запас матеріалу на зношування. Таким чином, в запропоновану конструкцію з самого початку закладається зниження швидкості зношування отворів до мінімально можливої, а також запас на зношування у вигляді сформованих виступів.

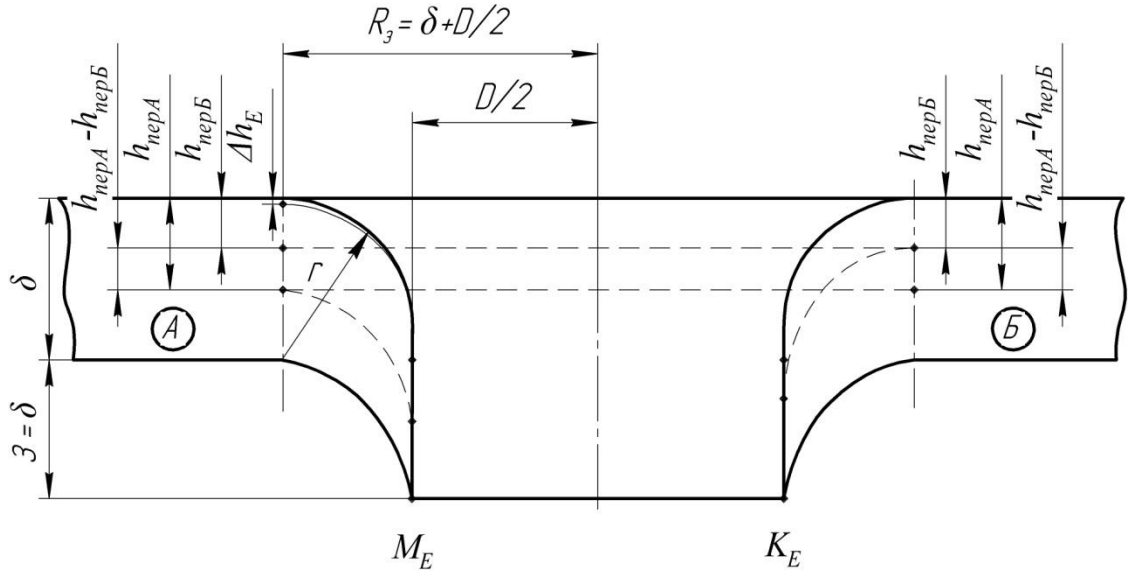


Рис. 2.10. Конструктивне рішення форми отвору природного зношування

Заклавши для запропонованого решета швидкість зношування отворів мінімально можливою $V_{\min}$ і залишаючи товщину решета, як і у серійного δ, знайдемо величину кроку серійного отвору наприкінці зношування. Він буде найменший серед можливих. З рівняння послідовності переміщень профілів (2.23) наприкінці зношування серійного решета при досягненні стороною (*А)* кінцевої точки *М*, для останнього кроку маємо:

$$\Delta h_M = \Delta h_{1A} - \left(n_M - 1\right) \cdot \Delta h_{aA}, \qquad (2.41)$$

де Δh_{1A} – частина шляху в переміщенні профілю сторони (*А)* на першому кроці;

Δh_{aA} – втрата частини шляху профілю в внаслідок рівносповільненого його переміщення;

n_M – кількість кроків в переміщенні профілю сторони (*А)* до повного зношування отвору (досягнення точки *М*).

Величини Δh_{1A} і Δh_{aA} є параметрами зношування сторони (*А)*отвору. Їх значення залежить від матеріалу решета, властивостей потоку зернового матеріалу і умов зношування, насамперед таких, як дія силового імпульсного навантаження на поверхню тертя, швидкості переміщення зерна відносно решета, тощо. Ці параметри визначаються в експериментальному дослідженні.

Кількість кроків в переміщенні профілю сторони (*А)* до повного зношування отвору n_M визначається згідно формули (2.28).

$$n_M \cdot \Delta h_{1A} - \Delta h_{aA} \cdot \sum_{i=1}^{n_M - 1} i \le \sqrt{2}\delta, \tag{2.42}$$

Приведена умова вирішується методом послідовних наближень (кроків ітерацій) до виконання рівності. Мінімальна різниця або рівність лівої і правої частин дають необхідну для розрахунку Δh_M кількість кроків.

Таким чином, робочий крок при зношуванні отвору тороїдальної форми є величиною постійною і для експериментального решета визначається мінімально можливим кроком серійного решета, який для сторони (*А*) дорівнює:

$$\Delta h_{AE} = \Delta h_M \tag{2.43}$$

Відповідно для сторони (*Б)* отвору маємо:

$$\Delta h_{БЕ} = h_к = \Delta h_{1Б} - \left(n_к - 1\right) \cdot \Delta h_{aБ}, \tag{2.44}$$

де $\Delta h_{1Б}$ – частина шляху в переміщенні профілю сторони (*Б)* на першому кроці;

$\Delta h_{aБ}$ – втрата частини шляху профілю в наслідок рівносповільненого його переміщення;

$n_к$ – кількість кроків в переміщенні профілю сторони (*Б)* до повного зношування отвору (досягнення точки *K*).

Розраховуються параметри зношування $\Delta h_{1Б}$, $\Delta h_{aБ}$ і n_K сторони (*Б)* аналогічно як і сторони (*A)*.

Враховуючи, що товщина решета як серійного так і експериментального взята однаковою і складає δ, кількість кроків експериментального решета до повного зношування дорівнює:

$$n_E = \frac{\delta}{h_{AE}} = \frac{\delta}{\Delta h_{1A} - (n_M - 1) \cdot \Delta h_{aA}} \tag{2.45}$$

Порівнюючи між собою кількість кроків запропонованого експериментального решета з тороїдальними отворами і серійного до повного їх зношування отримано степінь підвищення довговічності:

$$G_{E1} = \frac{n_E}{n_M} \cdot 100\% \tag{2.46}$$

Якщо враховувати перевертання серійного решета, то степінь підвищення довговічності решета з тороїдальними отворами по відношенню до серійного визначається відношенням:

$$G_{E2} = \frac{n_E}{n_{пер}} \cdot 100\%, \tag{2.47}$$

де $n_{пер}$ – кількість кроків серійного решета до його перевертання.

Експериментальне решето з тороїдальними отворами внаслідок своєї геометричної симетрії допускає, як і серійне, реверсний переворот для продовження подальшої роботи. Важливим при цьому є визначення своєчасного здійснення операцій перевороту решета для досягнення максимально можливої його довговічності (максимальної кількості кроків). Враховуючи те, що експериментальне решето з отворами природного зношування пошарово і рівномірно зношується та зберігає свою початкову форму, визначення кількості кроків до перевертання значно спрощується в порівнянні з серійним.

На момент перевертання сторона *(А)* тороїдального отвору проходить стільки ж кроків як і сторона *(Б)*, однак величина цих кроків різна. Тому при рівномірному покроковому зношуванні сторін можна записати:

$$n_{пер}\Delta h_{АЕ} = h_{перА};$$
$$n_{пер}\Delta h_{БЕ} = h_{перБ}.$$

Перевертання решета визиває збільшення шляху зношування сторони (*А)* на відрізок $h_{перА} - h_{перБ}$ В той же час шлях сторони (*Б)* при зношуванні скорочується на таку ж величину (рис. 2.10). Тому для сторін, що розглядаються, можна записати:

Сторона *А:*
$$h_{АЕ} = h_{АЕ}(i)\Big|_{i=1}^{n_{пер}} + \left(h_{перА} - h_{перБ}\right) + h_{АЕ}(i)\Big|_{i=n_{пер}}^{n_{МЕ}}; \quad (2.48)$$

Сторона *Б:*
$$h_{БЕ} = h_{БЕ}(i)\Big|_{i=1}^{n_{пер}} + h_{БЕ}\Big|_{i=n_z}^{n_{КЕ}}, \quad (2.49)$$

де n_z – кількість кроків, що необхідно пройти стороні (*Б)* до досягнення її профілем такого ж стану (шляху переміщення), який отримає сторона *(А)* на момент перевертання решета.

Задача вибору оптимального значення кроку перевертання $n_{пер}$ зводиться до забезпечення умов одночасного завершення роботи сторонами отвору при досягненні решетом максимально можливого наробітку.

З рівняння (2.48) видно, що перша і остання складові складають повний шлях зношування від першого до кінцевого кроку, а друга, що в дужках, є додатком до цього шляху в продовженні довговічності роботи отвору. Вона дорівнює:

$$h_{перА} - h_{перБ} = n_{пер} \cdot \Delta h_{АЕ} - n_{пер} \cdot \Delta h_{БЕ} = n_{пер} \left(\Delta h_{АЕ} - \Delta h_{БЕ} \right) \qquad (2.50)$$

Додатковий відрізок шляху зношування визначається кількістю кроків до перевертання і різницею в самих кроках за сторонами отвору. Величина їх розраховується з приведених раніше формул (2.41, 2.43, 2.44).

Для сторони (*Б)* необхідно визначити з якого кроку n_E потрібно починати другу частину шляху $h_{БЕ}$ (2.49). Шлях зносу сторони (*А)* до перевертання решета відомий і дорівнює $h_{перА}$. При перевертанні, крок з якого продовжує працювати сторона (*Б)*, враховуючи, що крок є величиною постійною, дорівнює:

$$n_z = \frac{h_{перА}}{\Delta h_{БЕ}} \qquad (2.51)$$

Таким чином, для суми переміщень сторін тороїдальних отворів експериментального решета необхідно і достатньо, з умови досягнення максимальної довговічності, виконання наступної умови:

$$h_{АЕ} + h_{БЕ} \to H_{\max} = 2\delta,$$

де $H_{мах}$ – максимально можливий загальний шлях при зношенні і переміщенні сторін отвору.

Підставляючи складові з (2.48 – 2.50) отримаємо:

$$h_{AE}(i)\Big|_{i=1}^{n_{ME}} + n_{пер}\left(\Delta h_{AE} - \Delta h_{БЕ}\right) + \Delta h_{БЕ}(i)\Big|_{i=1}^{n_{пер}} + \Delta h_{БЕ}(i)\Big|_{i=n_z}^{n_{KE}} = 2\delta \quad (2.52)$$

Рівність або максимальне приближення до рівності отриманого виразу визначає оптимальну кількість кроків до здійснення операції перевертання решета. Підвищення довговічності в результаті застосування конструктивного методу перевертання решета на менш зношену сторону визначається довжиною додаткової ділянки зношування (2.50).

Відповідно кількість додаткових кроків в наслідок своєчасного перевертання дорівнює:

$$n_{д} = \frac{n_{пер}\left(\Delta h_{AE} - \Delta h_{БЕ}\right)}{\Delta h_{AE}}. \quad (2.53)$$

Тоді, степінь підвищення довговічності експериментальних решіт з тороїдальною формою отворів близькою до форми природного зношування при їх перевертанні складає:

$$G_{ЕЗ} = \frac{n_E + n_{д}}{n_E} \cdot 100\%. \quad (2.54)$$

Висновки за другим розділом

1. Кутова форма граней отвору сепаруючого решета обумовлює нерівномірність його зношування в процесі експлуатації з утворенням криволінійних профілей.

2. Найбільша швидкість зношування профілей отворів спостерігається на початку їх роботи з поступовим її зниженням при прямуванні профілей до форми природного зношування.

3. Моделюванням процесу зношування сторін отворів виявлена нерівномірність в їх формоутворенні з поступовим переходом профілей до форм природного зношування. Процес зміни форми профілей отворів представляється як затухаючий з рівносповільненим їх переміщенням у глибину матеріалу деталі.

4. Основними параметрами, що визначають інтенсивність протікання процесу зношування є переміщення $\Delta h_{1А}$, $\Delta h_{1Б}$, $\Delta h_{аА}$ *і* $\Delta h_{аБ}$, від яких залежить динаміка формоутворення отворів.

5. Зношування отворів решіт представляє собою накопичувальний процес втрати матеріалу бокових поверхонь, які набувають криволінійної тороїдальної форми.

6. Для підвищення довговічності решіт доцільно перевертати решето на менш зношену сторону. Своєчасність операції перевертання визначається оптимальною кількістю кроків згідно приведених рівнянь (2.30) і (2.31).

7. Степінь можливого підвищення довговічності решіт конструктивним методом за рахунок реверсної їх експлуатації при перевертанні визначається співвідношенням кроків до повного одночасного зношення сторін отворів. Отримана максимальна довговічність серійних решіт може бути покладена в нормування загального їх ресурсу.

8. Доцільно для підвищення довговічності решіт, надати сепаруючим отворам початкову тороїдальну форму з найменшою швидкістю зношування, близькою до поверхні природного зношування.

9. Форма природного зношування отворів сепаруючих решіт відрізняється мінімальною швидкістю переміщення профілей, при чому величина переміщення за одиницю наробітку має постійне значення відповідно для сторони *(А)* і *(Б)*.

10. Степінь підвищення довговічності отворів тороїдальної форми в порівнянні із циліндричними серійними обумовлена співвідношенням кроків до повного зношування.

11. Експериментальне решето з отворами тороїдальної форми допускає реверсне перевертання для подальшої роботи. Даний конструктивний метод дає підвищення довговічності пропорційне збільшенню шляху зношування.

РОЗДІЛ 3
ПРОГРАМА І МЕТОДИКА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

Метою проведення експериментальних досліджень є підтвердження теоретичних передумов підвищення надійності сепаруючих решіт зернодробарок. Дослідженнями встановлюємо закономірності процесу зношування отворів серійних решіт, що дозволить встановити конструктивні параметри для нового експериментального сепаруючого решета. Результати досліджень мають як наукову так і практичну цінність для покращення роботи зернодробарок для підвищення їх загального ресурсу.

3.1. Програма експериментальних досліджень

Для перевірки і доповнення основної теоретичної інформації (розділ 2), направленої на підвищення ресурсу сепаруючих робочих органів, запропонована наступна програма експериментальних досліджень:

- дослідження динаміки зношування і встановлення закономірностей зміни геометричних параметрів отворів сепаруючих решіт;
- визначення структурних змін матеріалу серійних та експериментальних сепаруючих решіт після їх експлуатації;
- визначення наробітку серійних та експериментальних сепаруючих решіт до їх перевороту на 180° (реверсу), для збільшення можливого ресурсу;
- дослідження впливу зміни форми отворів сепаруючих решіт на якість вихідного продукту шляхом проведення фракційного (ситового) складу подрібненого матеріалу;
- проведення металографічних досліджень елементів ланок зношених сепаруючих решіт.

Запропонована методика експериментальних досліджень не потребує додаткових економічних витрат на введення конструктивних змін в будову зернодробарок.

3.2. Розробка інструменту для виготовлення експериментальних сепаруючих решіт та обладнання для проведення експериментів

Ефективність роботи сепаруючих решіт залежать від багатьох факторів, які характеризують спосіб виготовлення та умови їх використання. Для визначення раціональних показників довговічності, проводяться додаткові дослідження, в ході яких виявляються основні причини їх виходу з ладу, що призводить до погіршення якості вихідного продукту.

Виготовлення нових конструктивно-удосконалених сепаруючих решіт проходить із застосовуванням основних геометричних параметрів для деталей, що входять до складу штампу. Проведення технологічної операції виготовлення дослідних зразків експериментальних решіт здійснюється за допомогою штампу, який складається з:

- пуансона, спеціальна форма якого передається отвору решета у верхній (робочій) частині заготовки, округлюючи їх (рис. 3.1, а);

- матриці, яка розміщується під заготовкою і забезпечує випуклість отворів на зовнішній стороні решета (рис. 3.1, б).

Параметри отворів тороїдальної форми експериментального решета (рис. 2.10) є наступними:

- радіус дуги профілю отвору $r = \delta$;
- припуск матеріалу на зношування δ;
- радіус внутрішньої поверхні отвору $D/2$;
- радіус зовнішнього кола тороїдальної поверхні $R_3 = \delta + D/2$.

Для решета товщиною δ = 2 мм ці параметри складають r = 2 мм; 3 = 2 мм; $D/2$ = 2 мм; R_3 = 4 мм.

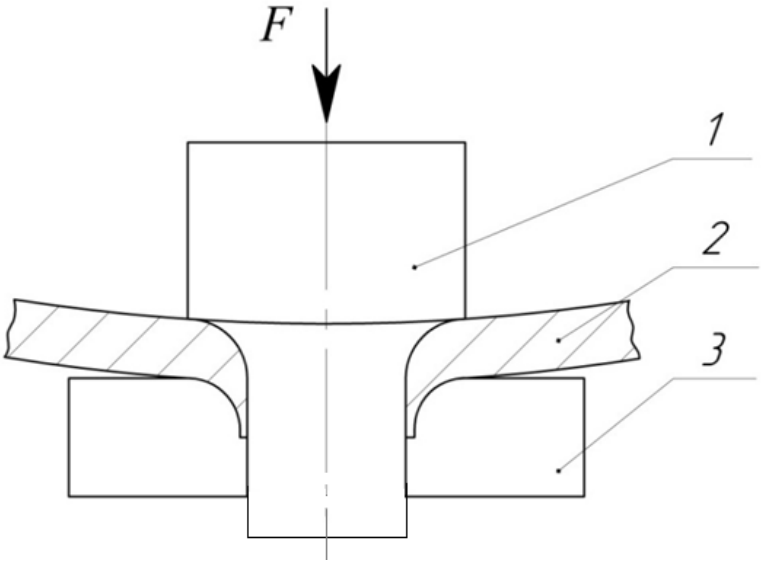


Рис. 3.1. Схематичне зображення виготовлення експериментальних решіт: 1) пуансон; 2) заготовка решета; 3) матриця.

Технологічна операція виготовлення експериментальних сепаруючих решіт (рис. 3.2) проводиться за допомогою виготовленого інструменту із застосуванням гідравлічного пресу ОКС-1671М. Серійне виробництво сепаруючих решіт на спеціалізованих підприємствах проводиться за допомогою холодного штампування з використанням прес-форми.

Рис. 3.2. Виготовлення експериментального сепаруючого решета

3.3. Методика зняття відбитків поверхні сепаруючих решіт

Динаміка зміни форми отворів при зношуванні сепаруючих решіт вивчалася за допомогою методу зняття відбитків стану поверхні з робочих ділянок решіт. Це дозволяє оцінити зміну форми просіюючих отворів без їх руйнування.

Цей метод включає застосування альгінатного відтискного матеріалу YPEEN SPOFADENTAL (ГОСТ 31573-2012 (ISO 4823:2000) «Матеріали відтискні стоматологічні. Технічні вимоги. Методи випробувань»), який наноситься на чисту поверхню і після повного затвердіння видаляється з робочої зони. Для виготовлення моделі фрагменту решета, відтиск заливається гіпсом для моделювання (4 класу) CONVERTIN HART, що володіє низькою усадкою при затвердінні і забезпечує високу точність роботи без будь-яких змін у структурі (характеристика даних матеріалів наведена у таблиці 3.1).

Таблиця 3.1

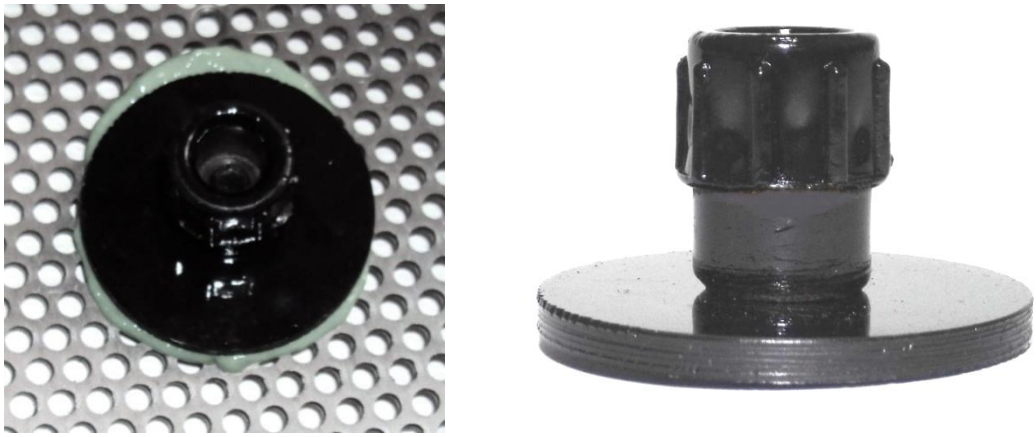
Характеристика відбиткових матеріалів

Характеристика	Матеріал	
	Ypeen Spofadental (відтискний матеріал) (ISO 4823:2000)	Convertin Hart (супертвердий гіпс)
Кількість води на 100 г продукту, мл	200	22
Час замішування матеріалу, с	30 – 45	30 – 40
Час, що затрачається на фіксацію відбивку, хв.	3	1
Тривалість затвердіння, хв.	3	6 – 16
Час знімання відбитку, хв.	1	20 – 30

Продовження таблиці 3.1

Відносна деформація після зняття, %	0,05	0,15
Повний час роботи, включаючи час на змішування, хв.	4	43

Закріплення відбиткового матеріалу на досліджуваній ділянці здійснюється за допомогою спеціально розробленого і виготовленого відбиткового фіксатора (рис. 3.3), робоча частина якого копіює поверхневу форму отворів сепаруючого решета.



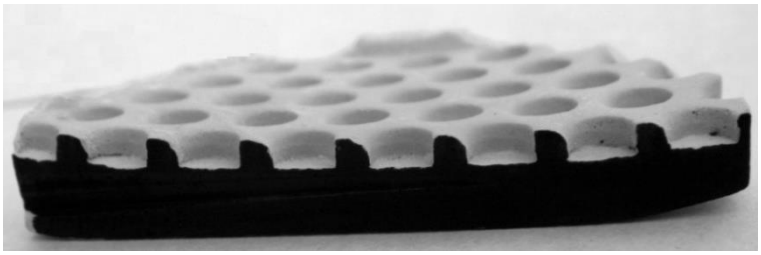
а б

Рис. 3.3. Зняття відбитків фрагментів решіт за допомогою фіксуючого пристосування: а) зняття відбитку з досліджуваної ділянки; б) загальний вигляд відбиткового пристосування (фіксатора).

Зняття відбитків з поверхні сепаруючих решіт проводиться наступним чином. На робочу частину фіксатора встановлюється завчасно підготовлений відбитковий матеріал. Після чого фіксатор разом із відбитковим матеріалом наноситься на ділянку решета, вдавлюється і залишається на 45 – 60 с до повного затвердіння. Відтиск, який отримано промиваємо під струменем води, у виняткових випадках (в умовах господарства), його

дозволено зберігати протягом 4 годин при 100% вологості. Зразок відтиску, який отриманий з поверхні решета поміщається у підготовлену спеціальну форму (рис. 3.4) та заливається приготовленою сумішшю моделюючого гіпсу. Через 20 – 30 *хв*. отримуємо готову модель, яка використовується для проведення вимірювань величин зносу отворів решета. Міцність при стиснені отриманого відбитку досягає 35 *МПа*, згідно характеристики матеріалу.

а б



в

Рис. 3.4. Отримання моделі частини решета: а) розміщення утвореного зліпка у форму; б) модель частини решета; в) відбиток частини решета у перерізі.

Зняття відбитків з поверхні сепаруючих решіт проводиться по всьому його периметру (12 реплік) через рівні проміжки наробітку $\Delta Q = 100$ т (рис. 3.5). Отримані моделі після кожного зняття нумеруються для подальшого співставлення за окремими ділянками робочої поверхні.

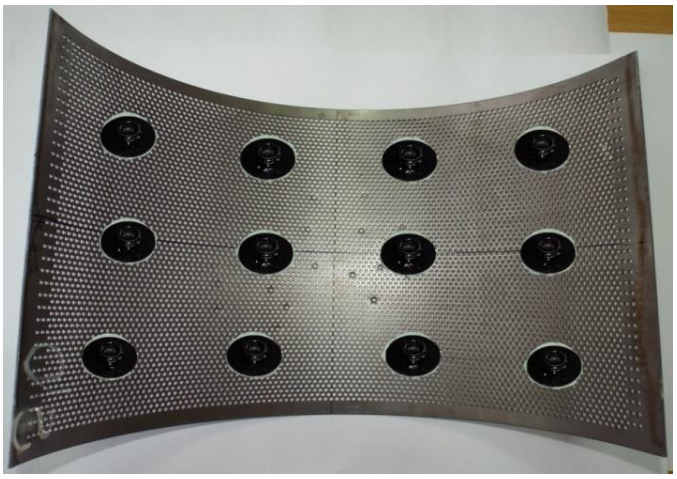


Рис. 3.5. Розташування відбитків на поверхні сепаруючих решіт

3.4. Методика дослідження динаміки зміни форми отворів робочої поверхні сепаруючих решіт

Дослідження надійності та ефективності використання сепаруючих робочих органів зернодробарок проводилися у виробничих умовах при подрібненні зерна пшениці.

Експериментальними дослідженнями передбачається проведення комплексних робіт з визначення як геометричних, так і функціональних параметрів ефективності використання сепаруючих решіт.

Для проведення досліджень готується пара експериментальних решіт. Дослідні зразки експериментальних решіт встановлюються на універсальній дробарці КДУ-2. Вимірювання стану поверхні сепаруючих решіт проводиться через деякий період наробітку дробарки (ΔQ), величина якого встановлюється попередніми дослідженнями або на підставі досвіду експлуатації решіт.

Фіксуючи форму профілів через інтервал наробітку (ΔQ) визначається динаміка зміни геометричних параметрів сепаруючих отворів решіт від наробітку. Профілі, що утворилися в процесі експлуатації визначають динаміку зміни форми отворів решіт, що дає можливість побудувати залежності зміни геометричних параметрів при допустимих і граничних

зносах. Зміна геометрії отворів вказує на формування особливої поверхні в процесі сепарації і може оцінюватися: зносом товщини шару і площею зношених дільниць в перерізі.

Кількісно оцінка довжини лінійного зносу отворів *(Δh)* залежить від кількості просіяного матеріалу, що проходить через отвори і в загальному вигляді функціонально описується залежністю:

$$\Delta h = f\left(Q\right).$$

Конкретна функціональна залежність для будь-якої точки профілю отворів решета встановлюється за результатами експериментальних досліджень з допомогою побудови сітки зносу.

Зміна форми поверхні отворів решета в процесі експлуатації представляється відповідними профільними кривими (рис. 3.6) C, D, E, F, G, H . Відстань між утвореними профілями складає шар матеріалу деталі, що зносився за проміжок наробітку. Товщину даного шару визначаємо за допомогою проведених нормалей до однієї із утворених поверхонь зношування, що дорівнює величині лінійного зносу у відповідних точках отвору в кожному періоді (*ΔQ)*. Таким чином, система профільних кривих і нормалей, які проведені до них утворюють сітку зносу. Дана сітка описує загальний характер зміни форми отворів та розподіл величин зносу на поверхні тертя в повному обсягу.

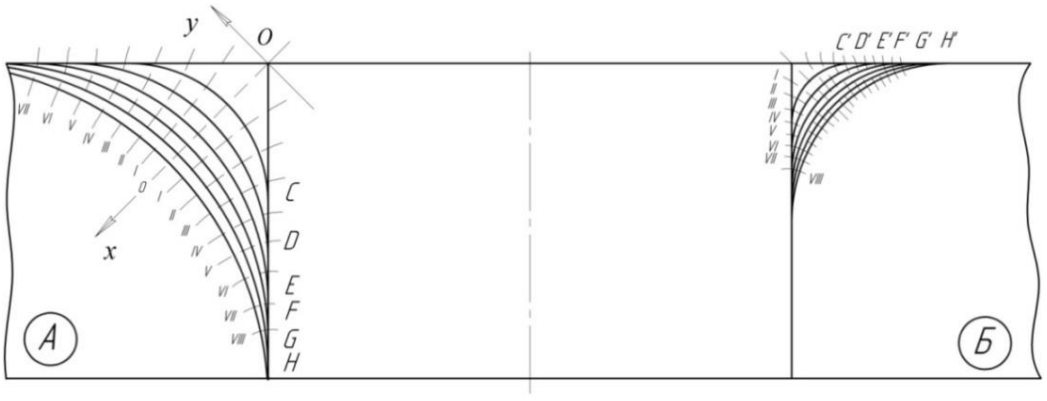


Рис. 3.6. Схема побудови сіток зносу в перерізі серійного решета.

Визначення довжин проведених нормалей між утвореними профілями необхідна для визначення лінійного зносу в наслідок формування поверхні решіт. Закономірність протікання процесу зміни форми отворів решіт представляє практичний інтерес, для подальшого обґрунтування вибору конструктивних або технологічних заходів підвищення довговічності сепаруючих робочих органів.

У вибраному масштабі зображень отриманих профільних кривих зносу отворів проводимо побудову сітки зносу (рис. 3.7, 3.8). Для цього на утворених профільних кривих через рівновіддалені точки проводимо нормалі, вважаючи, що лінії зносу в проміжках між проведеними нормалями прямолінійні. Для завершення побудови сітки зносу, на перетині нормалей (ліній зносу) проводимо перетини $0, I, II, III, IV, V, VI, VII, VIII$, які визначають переміщення профілю отвору у встановлені періоди наробітку. Точність запропонованого методу залежить від кількості проведених перетинів.

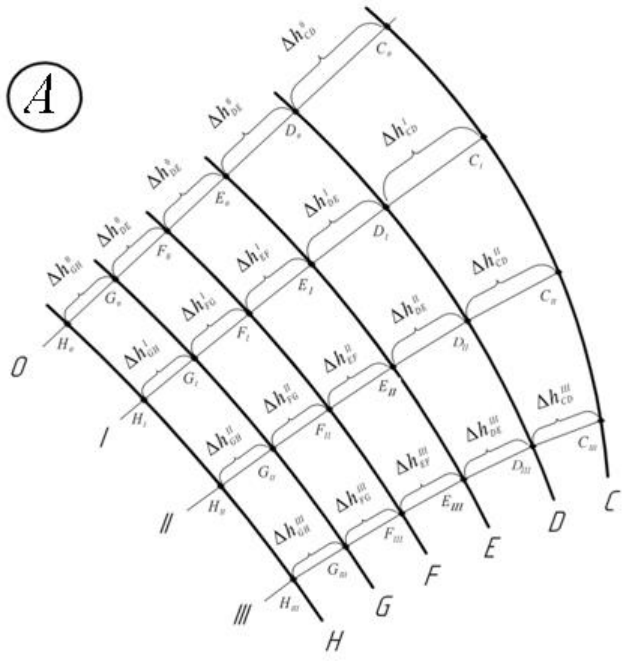


Рис. 3.7. Схема вимірювань зносу сторони (*A)* в перерізі отворів серійних решіт: C, D, E, F, G, H – профільні криві поверхонь тертя отвору решета; $0, I, II, III$ – лінійний знос за встановлені періоди роботи.

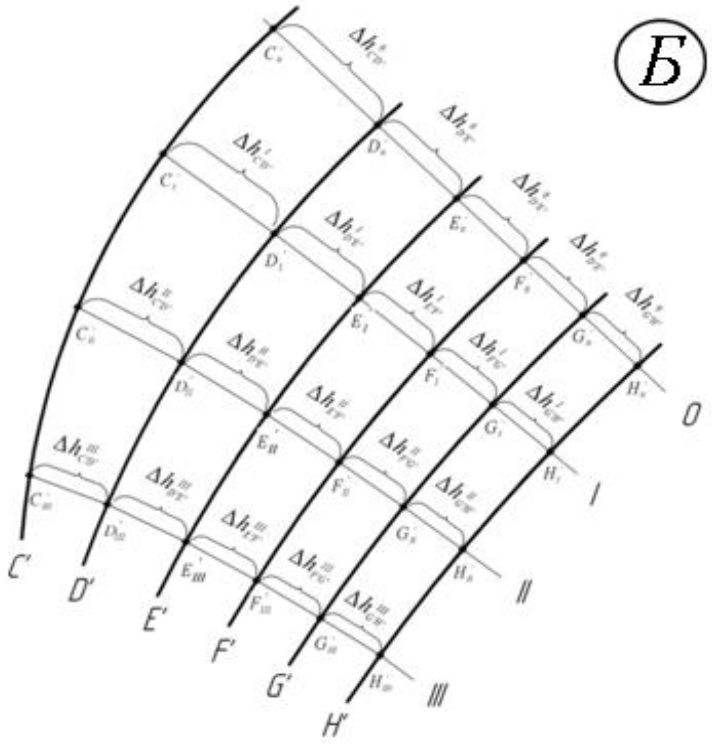


Рис. 3.8. Схема вимірювань зносу сторони (*Б)* в перерізі отворів серійних решіт: C', D', E', F', G', H' – профільні криві поверхонь тертя отвору решета; $0, I, II, III$ – лінійний знос за встановлені періоди роботи.

Вимірювання величин зношування по нормалі «0» проводиться з початкової точки C_0, в якій лінійний знос за встановлений проміжок Q_2 буде дорівнювати відрізку Δh^0_{CD}. Аналогічно визначається величина лінійного зносу за проміжок наробітку Q_3 в точці D_0, яка пересікається нормаллю з поверхнею E і визначається довжиною Δh^0_{DE}. В такій послідовності встановлено величину лінійного зносу у всіх наступних точках E_0, F_0, G_0: Δh^0_{EF}, Δh^0_{FG}, Δh^0_{GH}.

Оскільки, будь-який проміжок лінійного зносу дорівнює довжині відрізку відповідних нормалей, то в такому випадку величина лінійного зносу в точці C_0 за весь період наробітку буде дорівнювати довжині лінії C_0H_0. Очевидно, що лінія $C_0, D_0 ... H_0$ перейде у проведену нормаль «0», яка задається сімейством поверхонь тертя отвору сепаруючого решета. Виходячи

із даного визначення величини лінійного зносу (загальна довжина нормалей) називається лінією зносу. Тоді, за весь період експлуатації решета знос отвору буде дорівнювати сумі усіх величин проміжних лінійних зносів:

$$\Delta h = \sum_{i=1}^{n} h_i$$

Зміна вказаних параметрів при виконанні процесу сепарації приводяться до протилежних сторін отвору одночасно, що підкреслює особливості формування профілів.

Основними характеристиками втрати матеріалу, що відображують специфічні особливості формування поверхонь при зношуванні, є площі зношених елементарних ділянок ΔS, які знаходяться між двома утвореними профільними кривими. За величиною цих окремих площ можна свідчити про розподіл і величини зносу поверхонь отворів. Обчислення площ зношених елементарних ділянок проводиться за допомогою програми КОМПАС-3D розрахунків ЕОМ. На основі отриманих даних будуються відповідні залежності.

3.5. Обладнання для перевірки вологості зернового матеріалу

В процесі подрібнення важливою ознакою, що впливає на якість подрібнення та характеризує здатність матеріалу до руйнування, є вологість матеріалу. Збільшення вологості зерна до 30% призводить до його зминання при подрібненні та налипання на робочі органи, що негативно впливає на процес руйнування та видалення готового продукту з робочої зони.

Для контролю якості подрібнення перед кожним завантаженням зерна до подрібнювальної камери проводиться вимірювання вологості матеріалу, яка повинна знаходитись в досить вузьких межах, від 12% до 14%, тобто є фіксованою [146]. Відповідні заміри здійснюються за допомогою експрес-

вологоміра ВСП-100 (рис. 3.9) [147] (характеристика вологоміра наведена в таблиці 3.2).

Рис. 3.9. Прилад для визначення вологості зернового матеріалу ВПС-100.

Таблиця 3.2

Характеристика експрес-вологоміра ВСП-100

№ п/п	Характеристика	Параметри
1.	Діапазон вимірюваної вологості, %	до 70
2.	Межа основної абсолютної похибки, %	0,5 – 1,0
3.	Час одиничного вимірювання, хв.	1
4.	Маса вимірюваного матеріалу, г	50
5.	Температура зерна, що аналізується	+ 5 ... + 35°С
6.	Температура навколишнього повітря	+1… + 40°С
7.	Габаритні розміри, мм	180×80
8.	Маса, кг	0,7

3.6. Методика визначення якості подрібнення зерна

Проведення оцінки якості подрібнення матеріалу відбувається у відповідності з діючими стандартами ДСТУ та ГОСТ [148-150]. Особливістю визначення фракційного складу є те, що його проводять одночасно із визначенням параметрів зміни форми отворів через встановлений період наробітку. Дослідження фракційного складу подрібненого зерна проводиться згідно ДСТУ ІСО 2591–1:2004 «Ситовий аналіз».

Для проведення досліджень використовується решітний класифікатор марки JEL 200 з набором сит діаметр отворів яких складає: 0,2; 1; 2 та 3 мм (рис. 3.10), та електронно-цифрові ваги марки SF–400 [151].

а б

Рис. 3.10. Решітний класифікатор: а - загальний вигляд; б - набір сит.

Ситовий аналіз проводиться в наступній послідовності:

1. За допомогою електронно-цифрової ваги SF–400 відбираємо проби масою 0,1 кг.

2. Встановлюємо на ситовий класифікатор піддон та чотири сита (в порядку зменшення розмірів отворів зверху до низу).

3. Регулюємо режим роботи класифікатора (частота коливань 110…120 $хв^{-1}$ та амплітуда коливань 0,1 м).

4. Пробу матеріалу висипаємо на верхнє сито, набір закриваємо кришкою, після чого проводимо фіксацію сит і струшуємо протягом 5 хв.

5. Після закінчення просівання кожну фракцію, що залишилася на ситах, зважуємо на вагах.

6. При двох паралельних експериментах на одному і тому ж зразку допускається розходження, що не перевищувало 0,1%.

7. За кінцевий результат експерименту приймається середнє арифметичне значення результатів двох паралельних дослідів.

За результатами експериментальних досліджень та отриманих даних будуємо графічні залежності зміни величини подрібнення зерна в залежності від наробітку. Оцінюємо якість подрібнення та визначаємо ступінь нерівності фракційного складу.

3.7. Методика топографічних досліджень зношеної поверхні сепаруючих решіт

Для встановлення факторів, які призвели до руйнування в поверховому або об’ємному шарі сепаруючих решіт проводяться дослідження топографії поверхонь. Для цього використовуються оптичні та електронні методи збільшення зображень ділянок поверхні. Дослідження стану поверхні при збільшені до ×10 проводимо фотографічними методами з використанням оптичних систем сучасних цифрових камер. Відповідно до цього, отримані фотографії стану поверхні дають явну картину характеру пошкодження з виявленням ділянок, які при звичайній органолептичній діагностиці залишилися не визначеними. Контрастне проявлення дефектів можливе при нанесені на поверхні слабких розчинів азотної кислоти.

Зовнішнє проявлення пошкоджень не дає повної інформації про причини їх виникнення, особливо, якщо це пов’язано з появою внутрішніх дефектів та порушенням технології виготовлення решіт. Для підтвердження або спростування даних фактів проводяться металографічні та топографічні дослідження, визначаємо твердість, а за необхідності і мікротвердість матеріалу з якого виготовлялася решето, до і після його експлуатації.

Топографічний аналіз поверхонь деталей проводиться для опису їх стану і виявлення можливих макро- та мікропошкоджень. На першій стадії, дослідження проводимо візуально, а потім за допомогою оптичних приладів, при збільшеннях до ×30 разів і можливості фотографування зношених ділянок решіт, які представляють науковий і практичний інтерес.

Ці дослідження дозволяють вивчити зміни в поверховому шарі матеріалу, встановити його топографію (вибоїни, каверни, напливи та ін.) оцінити стан поверхні зношування при терті, дослідити формування виступів і перерозподілу матеріалу в наслідок дії силових факторів. Дію хімічних компонентів середовища можна бачити за слідами зносу і наявності або відсутності ознак протікання корозійних процесів.

Особлива увага приділяється вивченню поверхні, що безпосередньо контактує із зерновою масою, де можуть спостерігатися руйнування у вигляді утворення зачатків тріщин. При цьому важливо оцінити їх довжину і напрямок розвитку, а також потенційну загрозу загальному руйнуванню решета.

Опис загального стану сепаруючого решета, ступінь його зношування і отриманні пошкодження аналізуються та пояснюються причини, що призвели до їх виникнення. Типові пошкодження фотографуються.

3.8. Металографічний аналіз структурних змін матеріалу сепаруючих решіт

Правильне і якісне виконання операцій з виготовлення сепаруючих

решіт є основною передумовою підвищення довговічності при зношуванні його отворів і забезпечення міцності при навантаженнях. З іншого боку, порушення режимів термічної обробки може привести до виникнення в матеріалі решіт внутрішніх напружень і зачатків тріщин.

Об'єктивну оцінку стану решета дає металографічний аналіз. При його проведенні передбачається: приготування мікрошліфів зразків елементів решета; травлення зразків; аналіз мікрошліфів під мікроскопом; опис і аналіз структури з фотографуванням типових ділянок; встановленням зон зміцнення, виду і глибини його проникнення.

Для проведення досліджень використовується металографічний мікроскоп (типу МИМ-8), шліфувальна машина, полірувальні пристосування, оправки та зажими для зразків, фільтрувальний папір, спирт, вата та ін..

Шліфи для проведення досліджень виготовлюються з відібраних ділянок решіт. Протравлені зразки вивчаються при збільшеннях від ×50 до ×1000 разів. Типові структури фотографуються.

РОЗДІЛ 4
ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ДИНАМІКИ ЗМІНИ ФОРМИ ОТВОРІВ СЕРІЙНИХ ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ СЕПАРУЮЧИХ РЕШІТ

4.1. Аналіз умов роботи та причини зношування отворів сепаруючих решіт в процесі експлуатації

В процесі подрібнення, зерновий матеріал рухається у внутрішньому круговому потоці по периметру камери. При усталеному режимі роботи дробарки інтенсивність проходження частинок крізь решето практично постійна і відповідає певній їх кількості, що проходить із камери на видалення.

Фракційний склад зерна при подрібненні визначається розміром отворів. Зміна цих отворів в процесі експлуатації призводить до втрати цього показника. В той же час, якість подрібнення зернової суміші є основним фактором, від якого залежать споживчі властивості кормів і в кінцевому результаті приріст ваги у тварин.

В процесі зношування при експлуатації дробарок, отвори сепаруючих решіт втрачають свої первинні геометричні параметри. При цьому профіль периферійної частини, поверненої в середину камери, приймає в перерізі форму кривої, яка поступово розвиваючись може привести до повного протирання перетинок між отворами.

Практикою експлуатації дробарок встановлено, що робоча частина решета піддається швидкому зносу та втраті початкової форми отворів, в результаті чого утворюється геометрична форма, яка суттєво відрізняється від початково-закладеної конструкції. Утворена внаслідок зносу форма одержує криволінійну поверхню, яка збільшує периметр для взаємодії із зерновою масою та в кінцевому випадку призводить до погіршення якості вихідного продукту.

Досвід експлуатації сепаруючих робочих органів вказує на низьку їх довговічність. Це приводить до необхідності проведення подальших досліджень, пов’язаних із забезпеченням працездатного стану, протягом їх найбільшого терміну експлуатації.

Фізична природа зношування сепаруючих решіт практично не вивчалася, внаслідок складності будови їх робочих поверхонь. Основною гіпотезою причин зношування поверхонь є вплив потоку зернової суміші, а також, невелика кількість абразивних частинок, що мають твердість, більшу за твердість матеріалу решета, кількість яких у завантажувальному матеріалі досягає 0,5%, а пилу 0,26% від загальної маси.

Попередньо проведеними дослідженнями проб зерна на засміченість зернами інших культур встановлено, що вміст сторонніх зернин не перевищує 5% (рис. 4.1.), що знаходиться в допустимих нормах і не може суттєво впливати на загальні результати досліджень.

Рис. 4.1. Засміченість матеріалу, що подрібнюється зернами інших культур

Наявність твердих компонентів, викликають часткові деформації і подряпини на поверхні контакту з решетом, поступово його руйнуючи. Тому зношування робочих поверхонь решіт розглядається як природній процес

втрати форми при контактній взаємодії робочого органу із матеріалом, що подрібнюється.

Якість подрібнення залежить від фізико-механічних властивостей зернового матеріалу, які визначають його руйнівні характеристики. Так, вологість, перш за все, впливає на його міцність та в подальшому, на показник ефективності помолу. Із збільшенням вологості зернового матеріалу збільшується його пластичність, що призводить до зростання в подрібнювальній камері інтенсивності ударів молотків та налипанням його на робочі органи. При подрібненні надмірно вологого зерна витрачається додаткова енергія та погіршується якість вихідного продукту. Також подрібнення даного виду зерна підвищує інтенсивність зношування, так само як і вплив агресивного середовища.

4.2. Дослідження стану поверхні зношених сепаруючих решіт

Основною причиною відмови та виходу з ладу сепаруючих робочих органів, які працюють в умовах контактної взаємодії із зерновим матеріалом, є їх знос. Заокруглені форми граней отворів решіт вказують на переважне зношування кутових ділянок, що знижують поверхневу міцність матеріалу на цих ділянках. В загальному випадку швидкість зношування залежить від багатьох факторів, які пов’язані із зносостійкістю матеріалу решета та його геометричними формами.

Рівномірно зношена поверхня отворів сепаруючих решіт при збільшенні представляє собою складний рельєф, збільшене зображення якої представлено на рис. 4.2. Специфічним для робочої поверхні є наявність окремих каверн та інших нерівностей.

Аналіз рисунка показує, що поверхня має тьмяний відтінок. Це обумовлено взаємодією робочого органу із зерновим матеріалом, твердість якого менша за твердість поверхні решета. Характерним, також, є наявність окремих суттєвих мікродефектів (вибоїни, каверни, подряпини). Це

обумовлене зіткненням робочого органу із дрібними твердими вкрапленнями (пісок, каміння), що також входять до складу зернового матеріалу, та розміри яких становлять близько 0,3 – 0,8 мм.

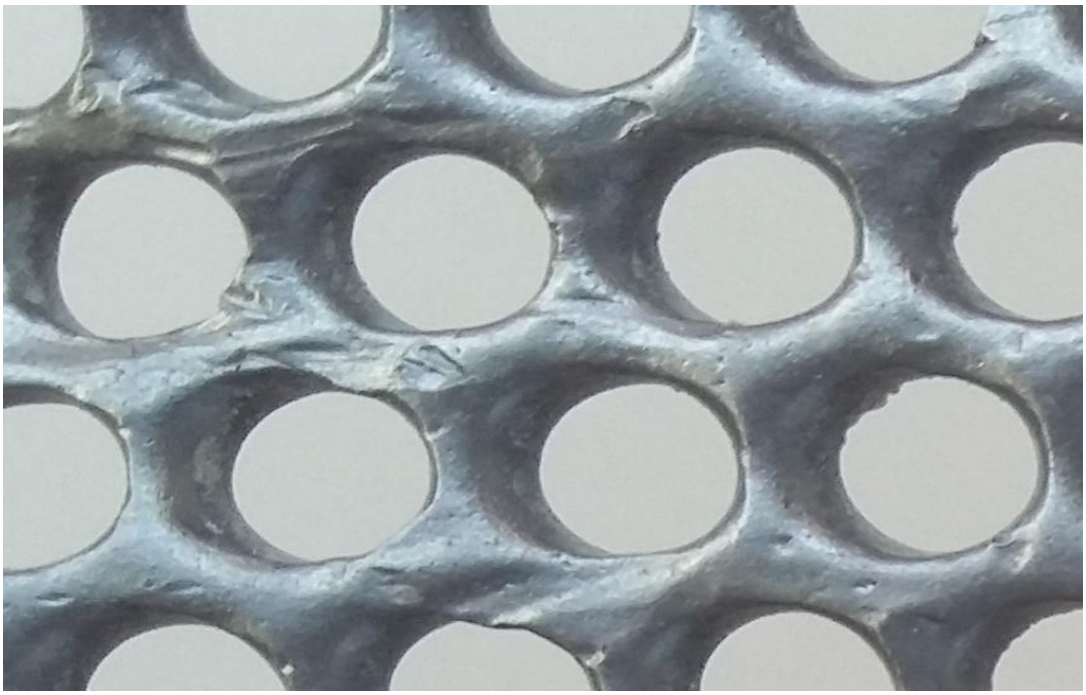


Рис. 4.2. Зношена поверхня серійних решіт

Дослідженнями топографії робочої поверхні зношених сепаруючих решіт виявлено, що поверхня відповідає шорсткості, близькій до *Ra* 3,2. Закруглені форми граней отворів решіт вказують на переважне зношування кутових ділянок внаслідок краєвих ефектів, що знижують поверхневу міцність матеріалу на цих ділянках.

Після проведення органоліптичного методу оцінки зміни стану поверхні решіт застосовуємо оптичні прилади, а саме металографічний мікроскоп МИМ–8. Стан зношеної поверхні решета при збільшенні показує пошкодження, що утворилися на поверхневому шарі матеріалу в процесі експлуатації (рис. 4.3). Отримані зображення при збільшенні показують стан деформованої поверхні решета.

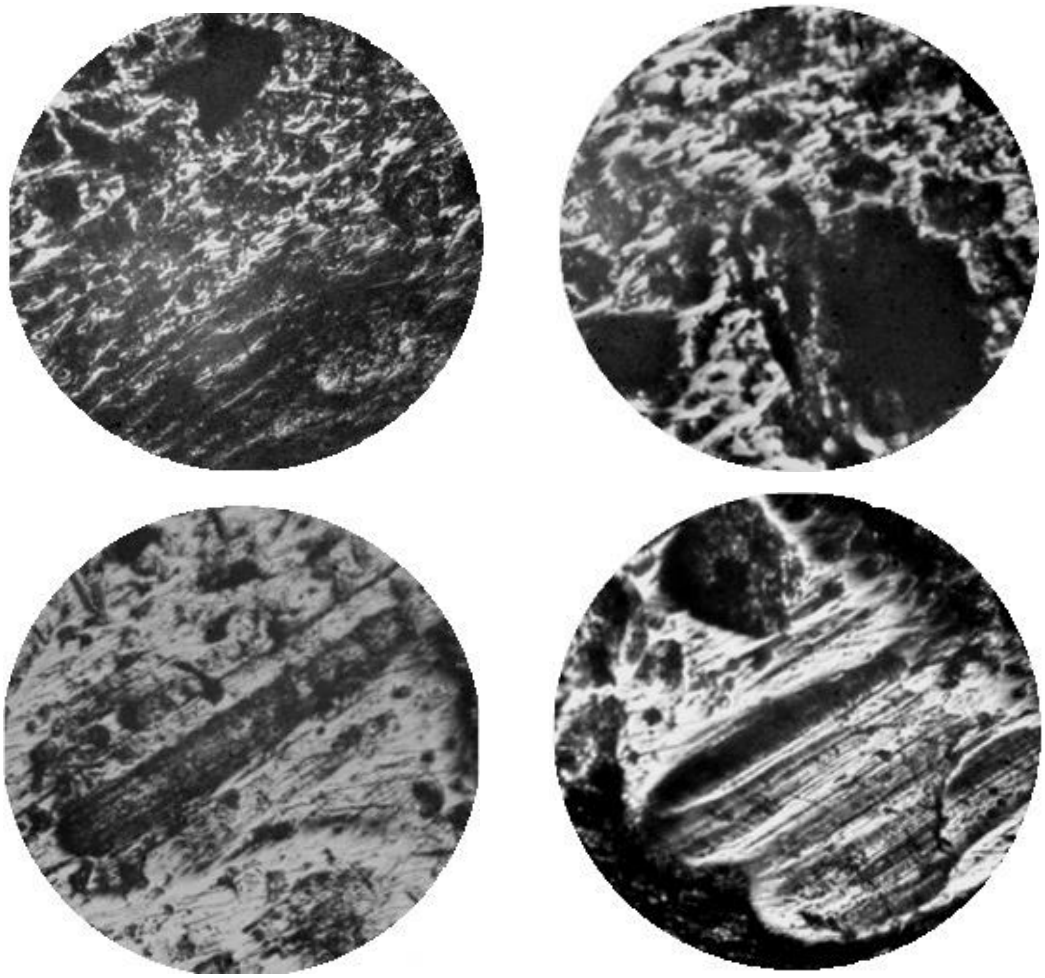


Рис. 4.3. Зношена поверхня матеріалу решіт (×100)

4.3. Дослідження динаміки зміни форми отворів серійних сепаруючих решіт

З метою дослідження динаміки зміни форми отворів серійних сепаруючих решіт при зношуванні розроблено метод зняття відбитків робочої поверхні (розділ 3.3). Зняття реплік з досліджуваних ділянок проводиться через рівні проміжки наробітку (ΔQ) з наступним фотографуванням отриманих профілів.

В процесі дослідження динаміки зміни форми отворів серійних сепаруючих решіт встановлено, що найбільш інтенсивний процес зношування і швидка втрата початкової форми отворів спостерігається на кутовій ділянці. Крім того, кутова дільниця отворів менш захищена від

пошкодження і є більш вразливою для дії зовнішніх факторів руйнування. В необхідності розвантаження, кутова початкова форма відносно швидко змінюється на округлу, тим самим розширюється периметр взаємодії отвору із зерновою масою.

Аналіз сімейства отриманих профілів при різних наробітках дробарки дає можливість кількісно оцінити поступові зміни форми отворів решета у перерізах, загальний вигляд яких представлений на рис. 4.4.

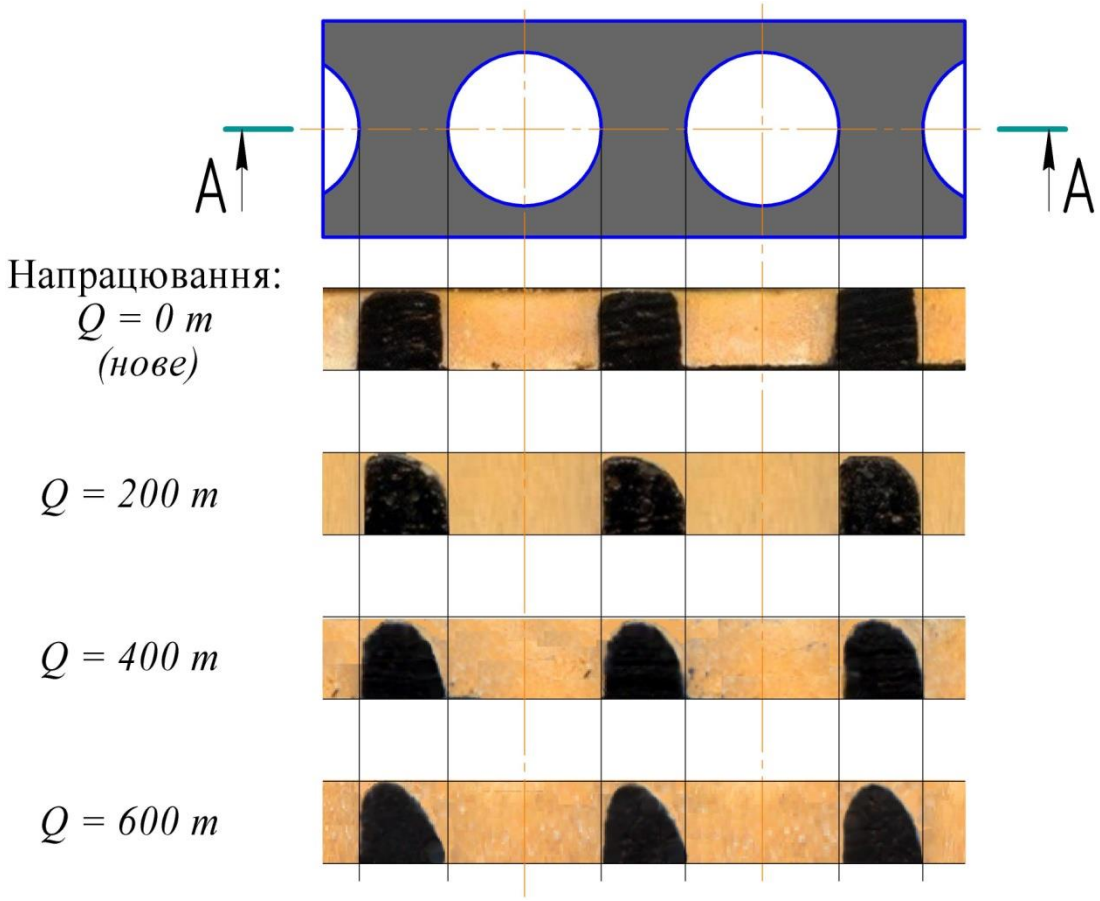


Рис. 4.4. Динаміка зміни форми отворів серійних сепаруючих решіт при зношуванні

Дослідження динаміки зміни форми отворів серійних сепаруючих решіт при різних наробітках дробарки дає можливість кількісно оцінити поступові зміни та встановити характер формування профілів зносу. Схематично динаміка поступової зміни форми отворів при зношуванні, а

також нанесення сітки зносу показано на рис. 4.5, аналіз яких передбачений розробленою методикою (розділ 3.4).

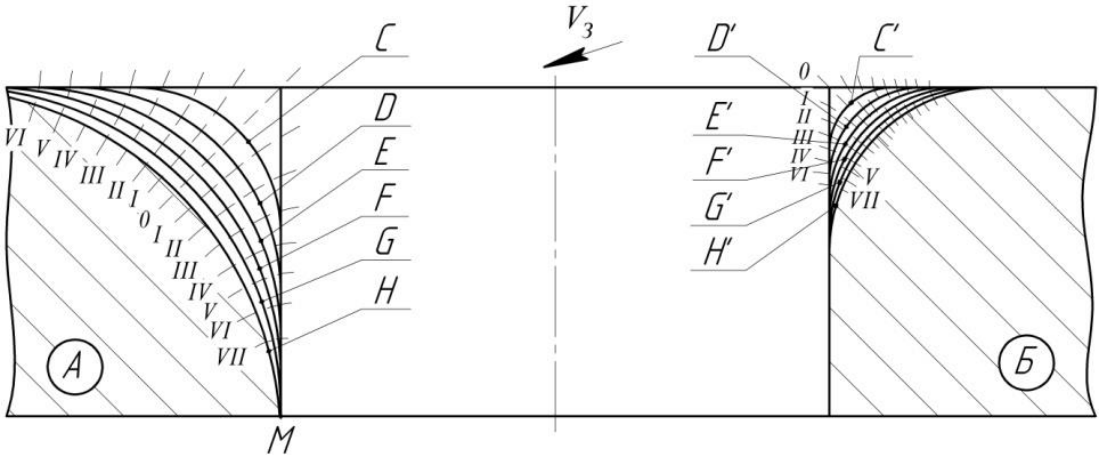


Рис. 4.5. Сітка зносу в перерізі отвору серійних сепаруючих решіт після наробітку: *C* – 100 т; *D* – 200 т; *E* – 300 т; *F* – 400 т; *G* – 500 т; *H* – 600 т; $0, I, II, III$ – лінійний знос за весь період наробітку (нормалі); V_3 – напрям руху зернового матеріалу.

Аналізом отриманих профілів зношування отворів у перерізі встановлено, що величина зносу на стороні *(А)* перевищує знос сторони *(Б)*. Причиною цього є різниця в кутах атаки поверхні решета частинками зерна, які визначаються орієнтацією протилежних поверхонь отворів і напрямом руху матеріалу $V_з$ у подрібнювальній камері.

Основним показником оцінки втрати форми отворів сепаруючого решета у потоці зернового матеріалу є інтенсивність зносу. В загальному випадку інтенсивність залежить від багатьох факторів, які зв’язані із зносостійкістю матеріалу решета та геометричними формами просіюючих отворів.

Дослідження інтенсивності зношування решіт дає можливість кількісної оцінки зміни форми отворів, шляхом визначення втрати товщини шару матеріалу (Δh) в інтервалах наробітку ΔQ = 100 т за допомогою сітки

зносу. Результат проведених розрахунків представлений в додатку Є та зображується графічно на рис. 4.6 та рис. 4.7.

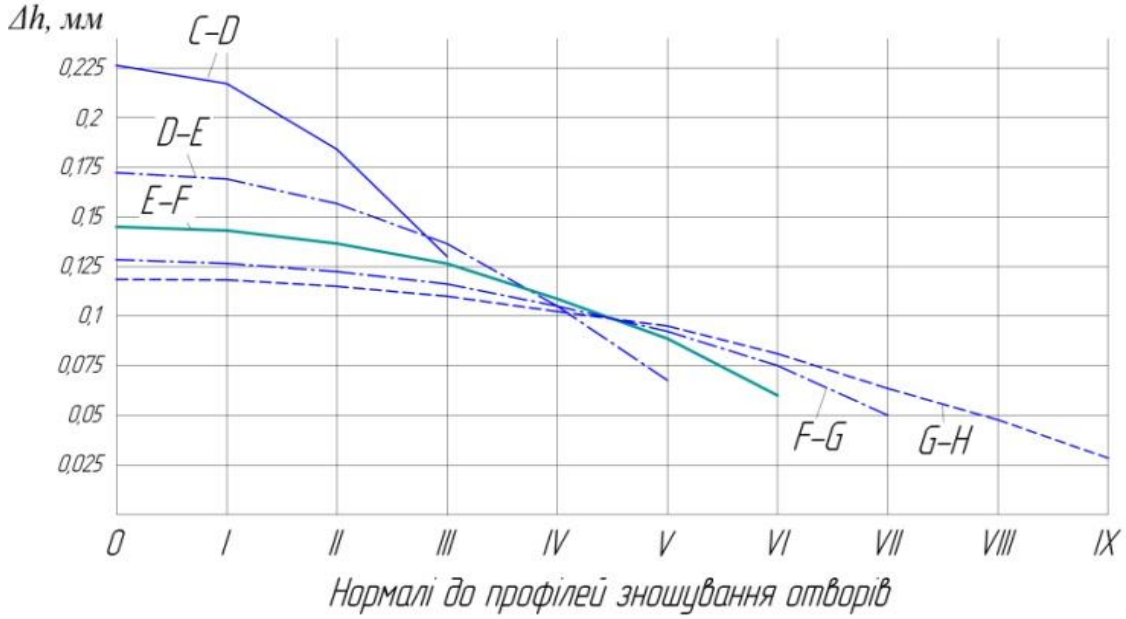


Рис. 4.6. Залежність втрати товщини матеріалу отворів решета на стороні (А) при наробітках: *C-D* = *Q* (100-200 т); *D-E* = *Q* (200-300 т); *E-F* = *Q* (300-400 т); *F-G* = *Q* (400-500 т); *G-H* = *Q* (500-600 т).

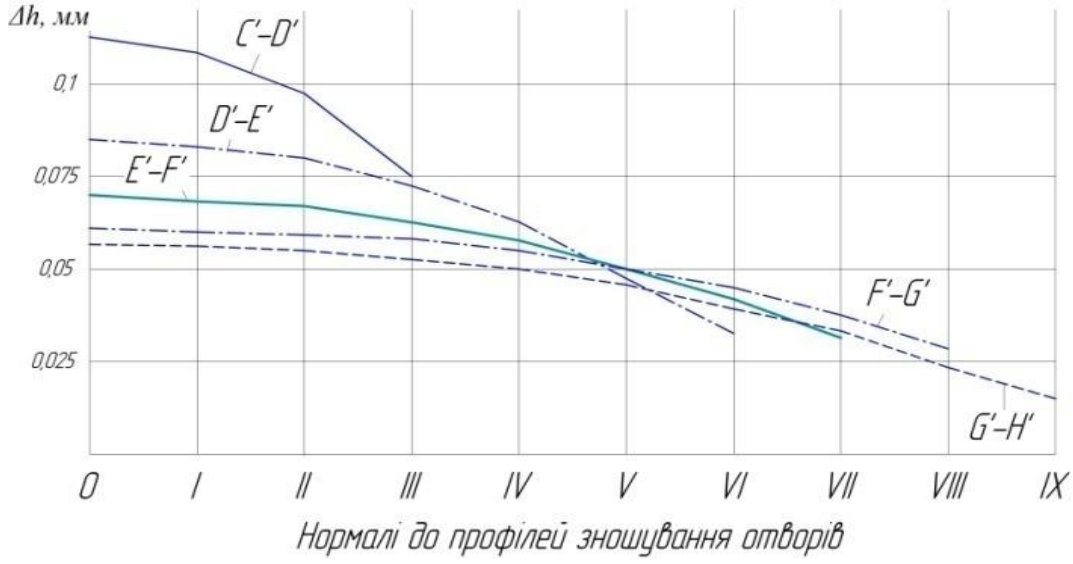


Рис. 4.7. Залежність втрати товщини матеріалу отворів решета на стороні (Б) при наробітках: *C'-D'* = *Q* (100-200 т); *D'-E'* = *Q* (200-300 т); *E'-F'* = *Q* (300-400 т); *F'-G'* = *Q* (400-500 т); *G'-H'* = *Q* (500-600 т).

Перший період експлуатації, після наробітку 100 т, характеризується початковим профілем зношування (рис. 4.5, поз. *C, C'*). Аналіз графіків показує, що на початку зношування отворів серійних решіт, товщина втраченого шару матеріалу складає 0,41 мм на стороні *(А)* та 0,23 мм на стороні *(Б)*.

Отриманий профіль після наробітку 100 т свідчить про те, що величина втраченого шару матеріалу в зазначеному періоді є величиною, яку можна не враховувати при подальших дослідженнях. Це пояснюється інтенсивним зношуванням кутової форми отворів в початковий період експлуатації з поступовою стабілізацією утвореного профілю, приймаючи форми природного зношування. Утворений профіль практично не змінюється, а наступне зношування пов'язане з переміщенням лінії профілю у глибину матеріалу. Бокові сторони сепаруючих отворів мають практично однакові величини зношування, тому їх аналіз не вносить особливих коректив у дослідження.

Контроль стану поверхні решета після наробітку ΔQ = 200 т показав переміщення утвореного профілю вглиб матеріалу деталі із збільшенням периметру зношування, як на стороні *(А),* так і на стороні *(Б)* (рис. 4.5, поз. *D, D'*). Аналізуючи отримані дані, можна зробити висновок, що співвідношення довжин дуг утворених профілів характерних сторін змінився в напрямку розширення периметру для взаємодії із подрібненим зерновим матеріалом.

Як видно з отриманих графіків, втрати товщини матеріалу отворів за сторонами носять нелінійний характер. На початку експлуатації решіт форма отворів досить швидко змінюється, набуваючи округлого профілю з максимальними втратами товщини шару матеріалу (рис. 4.6, лінія *C-D*; рис. 4.7, лінія *C'-D'*). Із збільшенням наробітку утворений профіль зберігає свій загальний характер формування (рис. 4.4) і просувається у глиб матеріалу деталі, займаючи нове своє положення, в той час, як товщина втраченого шару Δh в кожному періоді ΔQ зменшується. Це видно з отриманих профілів

(рис. 4.5, поз. *E, E*’) та представлено на графічній залежності величин лінійних зносів (рис. 4.6, лінія *D*-*E*; рис. 4.7, лінія *D’*-*E’*). Графік має більший в порівнянні із попереднім (*C*-*D*) інтервал змінних у визначенні втрат товщини робочої поверхні отворів. Що досить точно відображує специфічні особливості формування профілів зношування і показує зменшення втрат матеріалу просуваючись до бокових циліндричних поверхонь.

Збільшення наробітку серійного сепаруючого решета до 400 т зберігає загальну форму геометрії поверхні із розширенням периметру взаємодії робочого органу із зерновою масою (рис. 4.5, поз. *F, F*’). Однак, слід відмітити, що товщина втраченого шару за однакові інтервали наробітку *(ΔQ)* поступово сповільнюються, а загальна довжина профілів отворів – збільшується. Тобто процес утворення профілів зношування сепаруючих отворів носить затухаючий характер (рис. 4.6, лінії *F*-*G, G*-*H*; рис. 4.7, лінії *F’*-*G’, G’*-*H’*).

Проведені експериментальні дослідження підтверджують зменшення інтенсивності втрати товщини матеріалу при просуванні утвореного профілю отворів вглиб деталі, форма якого залишається практично незмінною.

Граничне зношування отворів серійного решета настає після наробітку Q = 600 т, при товщині решета 2 мм. Утворений профіль на стороні *(А)* досягає своєї нижньої точки *(М)* (рис. 4.5, крива *H*), в той час, як профіль на стороні *(Б)* переміщується повільніше (рис. 4.5, крива *H’*).

Обробка результатів інтенсивності зношування сторін сепаруючих отворів показує наступне, а саме, швидкість формування профілів зношування по обидві сторони отворів в перерізі набувають різних значень. При досягненні профілем на стороні *(А)* граничного значення, профіль на стороні *(Б)* пройде лише частину шляху. Отриманим результатом можна пояснити те, що конструктивно-закладений ресурс решета не використаний в повній мірі, оскільки сторона *(Б)* не досягла граничного значення.

Зміна форми поверхні сепаруючих отворів під час проведення досліджень зберігає криволінійну (тороїдальну) форму, яка розширює свої

границі взаємодії із подрібненим матеріалом. Це робить використання сепаруючих решіт з кутовою поверхнею отворів раціонально не виправданою, оскільки, зміна цієї форми проходить досить швидко із утворенням плавного профілю.

Отримані характеристики зміни форми отворів з достатньою точністю описують процес переходу утвореної початкової форми профілю у стабільніший. Це дозволяє виявити оптимальну форму поверхні для якої притаманні мінімальні втрати матеріалу решета при експлуатації.

На дослідних зразках серійних сепаруючих решіт присутні сліди незначного зносу граней отворів, що розташовані поблизу крайніх бокових сторін робочої камери. Припустимо, що цей процес пов'язаний із особливістю подачі в подрібнювальну камеру та захватом зернового матеріалу повітряним потоком. В середній частині решета спостерігається незначний прогин, який зменшується, просуваючись до бокових сторін, які закріплені у пазах корпусу. Ймовірно, що це явище пояснюється дією тиску зернового матеріалу на поверхню решета в процесі сепарації.

4.4. Збільшення можливого ресурсу роботи серійних сепаруючих решіт

Науковий і практичний інтерес полягає у вивченні формування профілів зношування отворів серійних сепаруючих решіт, а також можливість використання повного закладеного ресурсу. Експериментальні дослідження експлуатації решіт показують нерівномірність процесу зміни форми отворів за сторонами (рис. 4.5). Отримані результати оцінюються товщиною зношеного шару матеріалу (Δh) за кожен період наробітку ΔQ, що дозволяє виявити оптимальний стан розташування профілю для виконання операції перевертання решета на 180° (реверсу). Застосування даної операції, дозволяє збільшити термін експлуатації за допомогою одночасного зношування протилежних сторін отворів. При заданих початкових умовах

експлуатації решета, товщиною 2 мм та подрібненням-просіюванням зерна пшениці та ячменю з вологістю 12-14%, переворот доцільно проводити після наробітку 400 т. Отримані значення наробітку до перевороту решета визначається таким важливим параметром, як площа втраченого шару матеріалу.

Отримані зображення відбитків профілів отворів серійних сепаруючих решіт після перевертання (реверс) в перерізі представлено на рис. 4.8.

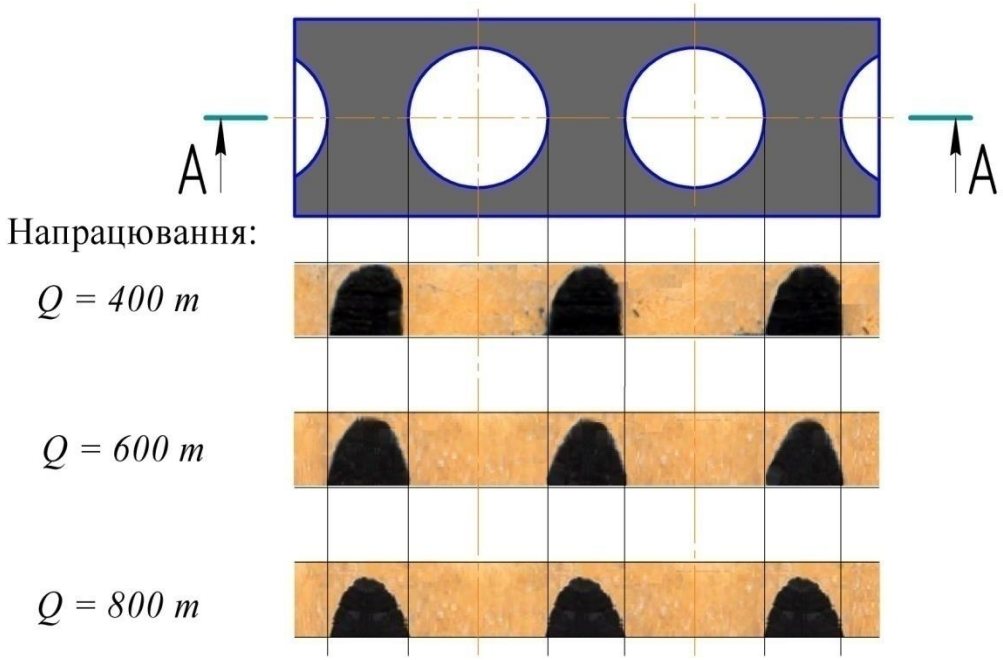


Рис. 4.8. Динаміка зміни форми отворів серійних сепаруючих решіт після перевертання на 180° (реверс)

Експлуатація серійних сепаруючих решіт зберігає загальну тенденцію зміни геометрії отворів в процесі зношування. Слід відмітити, що товщина втраченого шару матеріалу між утвореними профілями за однакові інтервали наробітку на кожній із сторін зменшується, просуваючись вглиб матеріалу (рис. 4.9). Отриманий результат підтверджує те, що процес утворення профілів зношування рухається в напрямку стабілізації форми отворів серійних решіт.

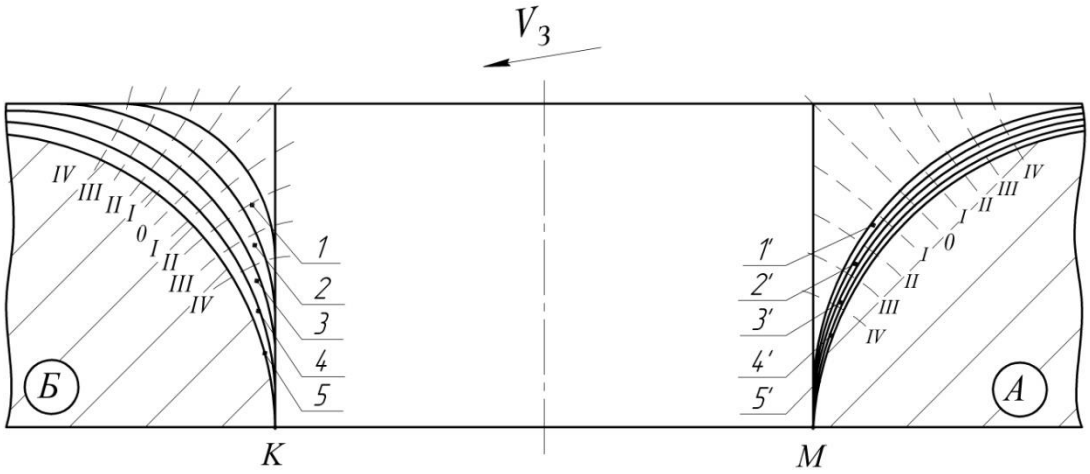


Рис. 4.9. Сітка зносу в перерізі отвору серійних сепаруючих решіт після наробітку: *1* – 400 т; *2* – 500 т; *3* – 600 т; 4 – 700 т; *5* – 800 т; $0, I, II, III$ – лінійний знос за весь період наробітку (нормалі).

Профіль отворів решета після наробітку 600-800 т набуває такої форми, яка покращують процес сепарації, про що свідчить якість вихідного продукту. Отримані властивості зберігаються і спостерігаються в подальшому до досягнення сторонами отвору граничного значення зношування (точок *M* і *K*). Перевертання решета дозволило збільшити загальний наробіток до відмови, що збільшилася із 600 т до 837 т.

Важливою характеристикою, що відображує специфічні особливості формування поверхонь при зношуванні, є визначення площ зношених ділянок ΔS, які знаходяться між двома утвореними профілями зношування в кожному періоді наробітку *ΔQ*. Результати обчислень цих площ, за допомогою програми КОМПАС-3D, покладені в основу побудови відповідних залежностей, які представлені на рис. 4.10.

Як видно з графіків, залежності зміни площі втраченого шару матеріалу решіт за сторонами *(А* і *Б)*, відрізняються між собою. Однак для кожної із сторін, за рівні проміжки наробітку, площі зношених дільниць практично одинакові: для сторони *(А)* ~ 0,097 *мм*^{2}, а для сторони *(Б)* ~ 0,056 *мм*^{2}. Це пояснюється стабільністю протікання процесу зношування на будь-якому етапі експлуатації решета. Очевидно, що даний результат не є

випадковим і підкреслює те, що робота, яка витрачається на зношування (втрату об’єму матеріалу), є величиною також постійною.

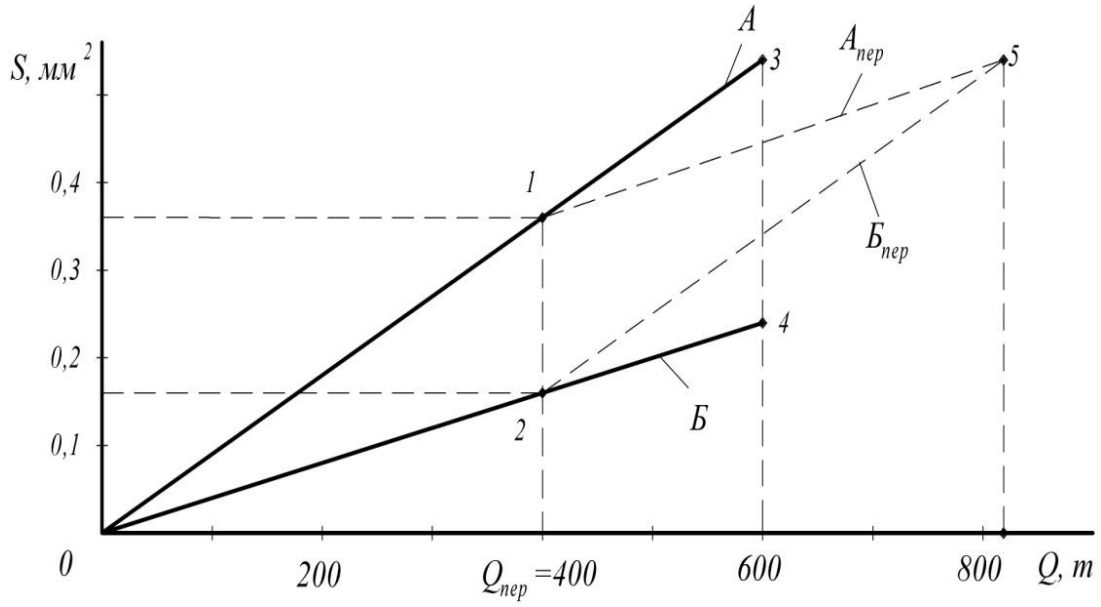


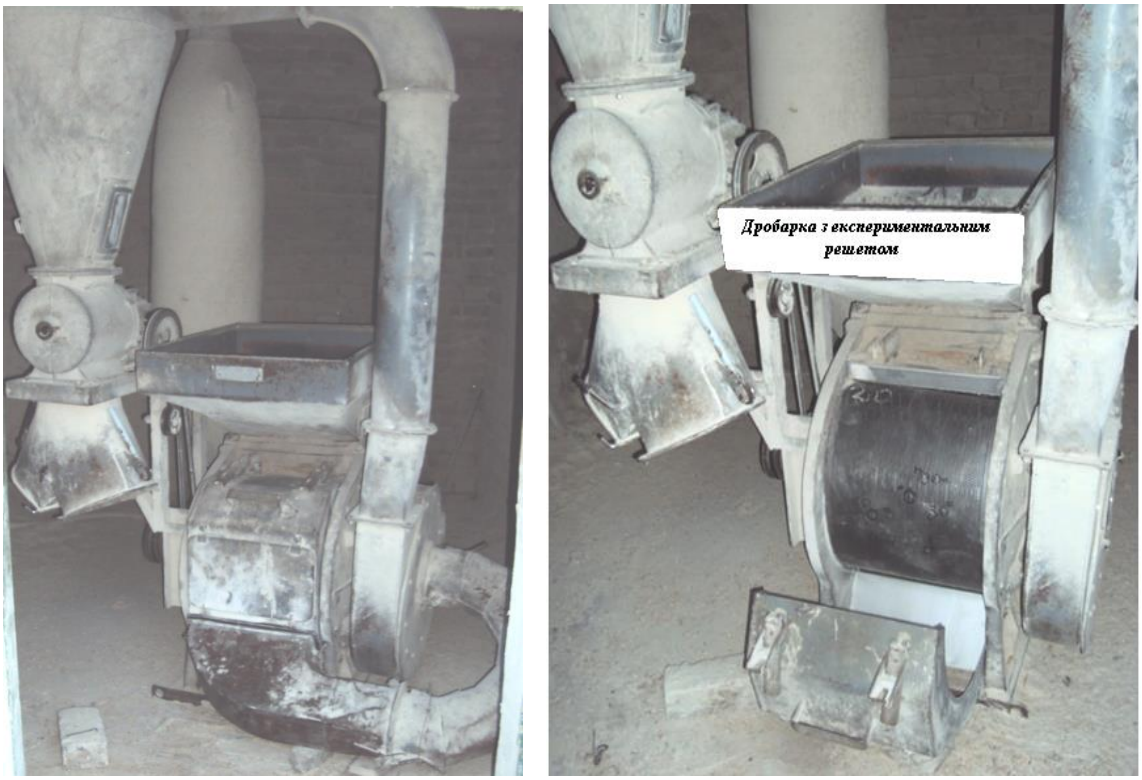
Рис. 4.10. Залежність зміни площі втраченого шару матеріалу в процесі експлуатації до і після перевороту на 180°: 3-4 – максимальний знос отворів без перевертання решета; 1-2 – оптимальний знос сторін отворів для виконання операції перевертання; 5 – максимальні значення зносу отворів подовженого ресурсу.

Внаслідок перевертання решета на 180° (реверсу) після наробітку 400 т менш зношена сторона *(Б)* займає положення на стороні *(А)* і продовжує зношуватись, але вже за параметрами протилежної сторони (рис. 4.10, $Б_{пер}$), і навпаки сторона *(А)* продовжує зношуватися за параметрами сторони *(Б*) (рис. 4.10, $А_{пер}$). В результаті цього площі зношування сторін поступово вирівнюються наближаючись одна до одної. При досягненні граничного зносу решета, сторони *(А* і *Б)* отворів втрачають однаковий об’єм матеріалу (рис. 4.10, т. 5), вичерпавши повний свій ресурс.

4.5. Динаміка зміни форми отворів експериментальних сепаруючих решіт

На підставі проведених досліджень зносу серійних сепаруючих решіт із врахуванням теоретичних передумов, розроблено експериментальне решето, форма отворів яких виконана по вгнутій поверхні наближеної до форми їх природного зношування (Додаток А).

Загальний вигляд універсальної дробарки КДУ-2,0, яка використовується для проведення експериментальних досліджень показано на рис. 4.11, а вигляд фрагменту експериментального решета представлено на рис. 4.12.



а) б)

Рис. 4.11. Універсальна дробарка для подрібнення кормів КДУ – 2,0: а) загальний вигляд; б) розміщення експериментального решета у подрібнювальній камері.

а

б

Рис. 4.12. Експериментальне решето з отворами тороїдальної форми:

а – поверхня контакту із зерновим матеріалом; б – неактивна (тильна) поверхня решета.

Як і для серійних решіт, дослідження зміни профілів зношування експериментальних решіт проводились шляхом зняття відбитків робочої поверхні в різних стадіях їх зношування.

Загальний вигляд зміни форми отвору зносу експериментального решета представлено на рис. 4.13. Характерною особливістю утворення робочих профілів експериментальних решіт є те, що вони мало змінюють свою початкову геометрію протягом всього терміну експлуатації. Аналізом отриманих профілів зношування отворів у перерізі встановлено, що формування профільних кривих на стороні *(А)* проходить інтенсивніше протилежної сторони *(Б)*, що характерно і при експлуатації серійних сепаруючих решіт.

Загальний вигляд сімейства профільних кривих отвору з нанесеною сіткою зносу представлено на рис. 4.14.

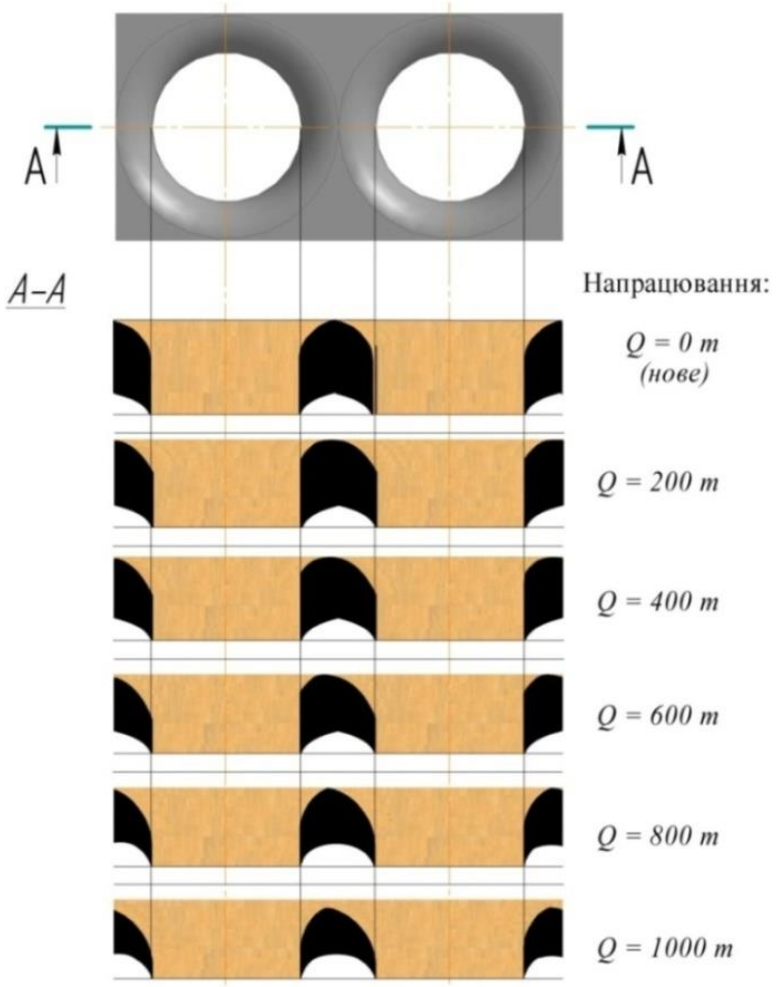


Рис. 4.13. Динаміка зміни форми отворів експериментальних сепаруючих решіт при зношуванні

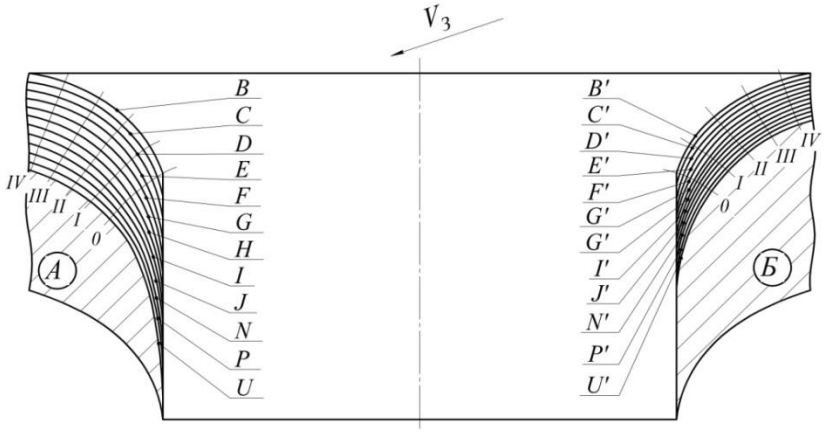


Рис. 4.14. Сітка зносу експериментальних сепаруючих решіт після наробітку: *B* – нове; *C* – 100 т; *D* – 200 т; *E* – 300 т; *F* – 400 т; *G* – 500 т; *H* – 600 т; *I* – 700 т; *J* – 800 т; *N* – 900 т; *P* – 1000 т; *U* – 1080 т (граничний знос).

Сімейство отриманих кривих вказує на принципово однаковий характер формування профілів зносу. В той же час спостерігається деяка нерівномірність розподілу величин лінійного зносу від положення нормалей. Так, для нормалі *(0)* вона менша ніж для нормалей більш високих номерів. Ця тенденція зберігається при включенні в зону зносу нових областей циліндричної поверхні отвору. Детальний аналіз розподілу лінійного зношування сторін отворів шляхом визначення товщини втраченого шару матеріалу (*Δh*) у кожному періоді наробітку представлено у додатку Ж та зображено на рис. 4.15 та рис. 4.16.

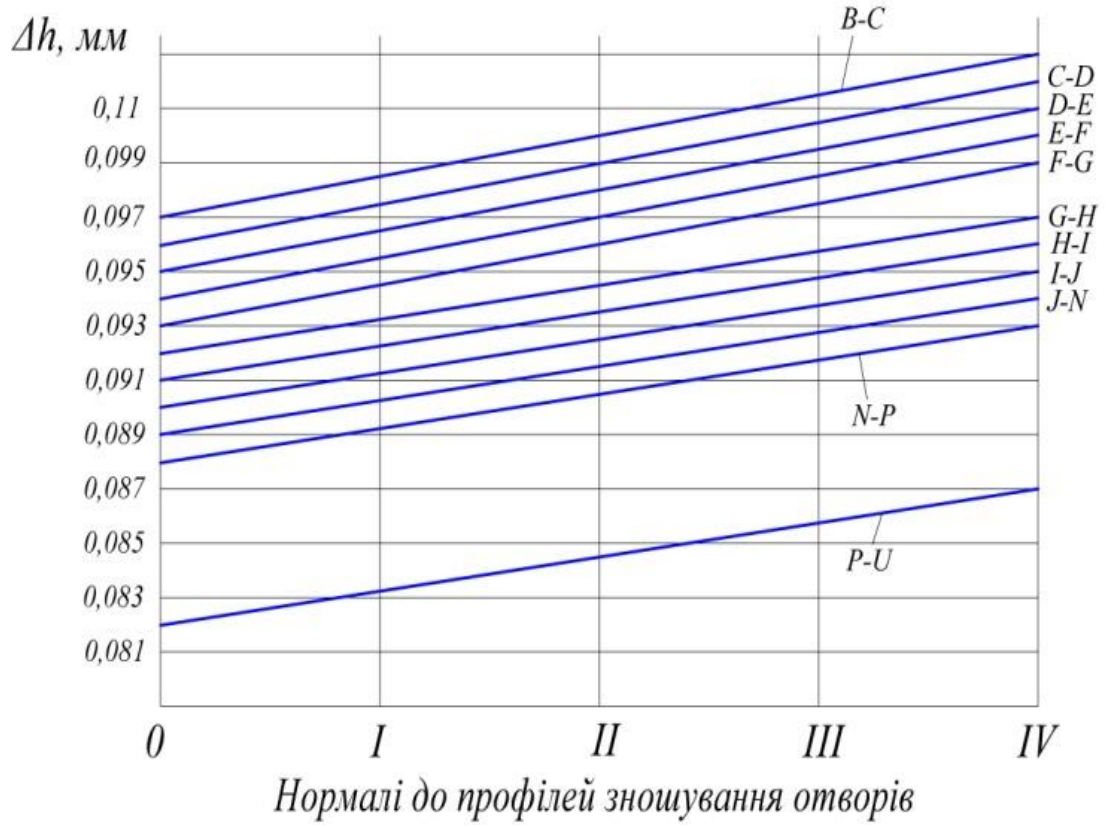


Рис. 4.15. Залежність втрати товщини шару матеріалу отворів експериментального решета на стороні *(A)* при наробітках

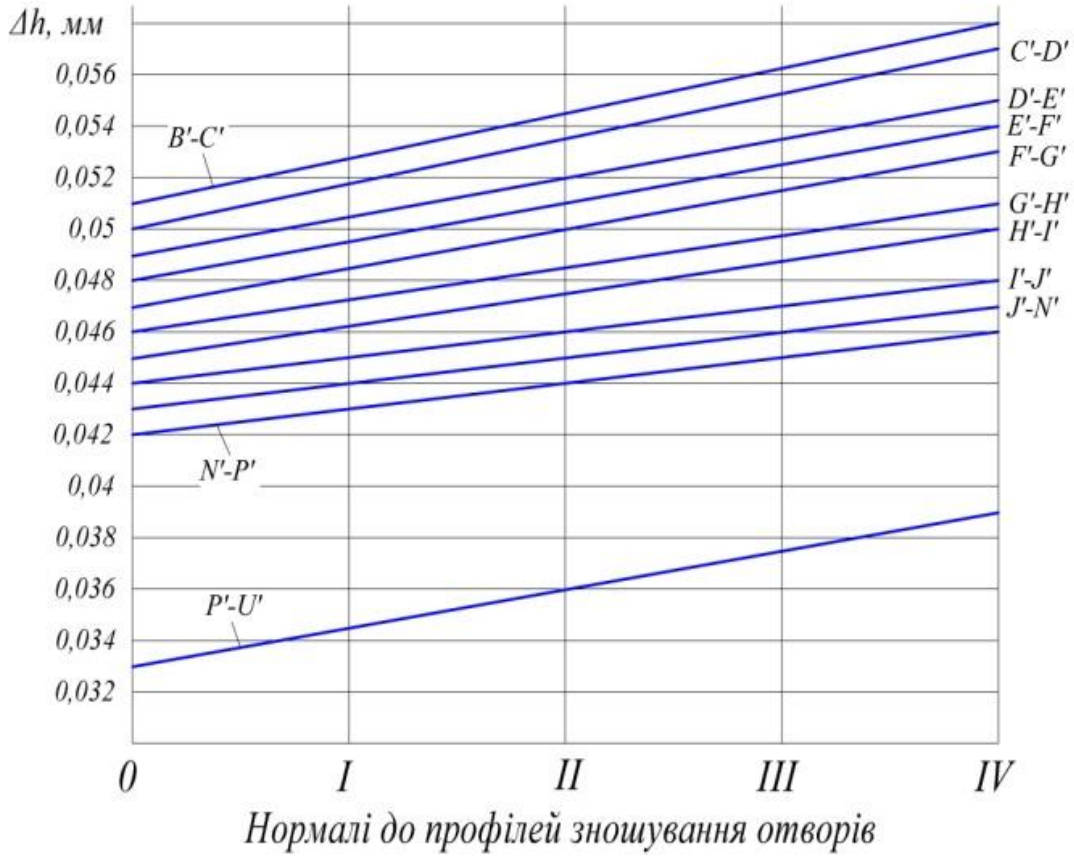


Рис. 4.16. Залежність втрати товщини шару матеріалу отворів експериментального решета на стороні *(Б)* при наробітках

Як було встановлено раніше, суттєве значення має характер контактної взаємодії поверхні решета із зерновим матеріалом. Переміщення профільних кривих, насамперед, пов’язана із втратою матеріалу з поверхні решета при проходженні подрібненого матеріалу крізь отвори.

Сімейство отриманих кривих вказує на загальний характер формування стабільних профілей. На всіх стадіях зношування експериментального решета з моменту напрацювання, значення товщини втраченого шару матеріалу зменшуються, а профіль просувається вглиб матеріалу решета. В міру зношування профілів, величини (Δh) зберігають свій загальний характер переміщення (рис. 4.15, 4.16) із частковим зменшенням втрат шару матеріалу в кожному періоді наробітку.

Зменшені втрати товщини матеріалу по нормалі *(0)*, пов’язані із перерозподілом ділянок дії тиску подрібнених частинок зерна при

проходженні крізь отвори. В той час, як за нормалями вищих порядків спостерігається збільшення зносу матеріалу в кожному періоді ΔQ.

З отриманих залежностей видно, що товщина шару зношування в кожному періоді наробітку практично не змінюється. Отриманий результат підтверджує те, що використання сепаруючих решіт з отворами тороїдальної форми є ефективним для підвищення їх довговічності.

Наробіток експериментального решета до повного зношування складає 1080 т просіювання подрібненого зерна пшениці та ячменю з вологістю 12-14%.

Принциповою різницею в роботі експериментальних сепаруючих решіт є те, що вони в процесі експлуатації ефективно виконують функцію з просіювання зернової маси потрібної фракції. Застосування нової форми отворів наближеної до форми природного зношування призводить до можливості формування таких профілів, що найменше змінюють свою форму. Відповідно, термін експлуатації решіт з отворами тороїдальної форми наближеної до форми природного зношування показує ефективність використання в порівнянні із серійними.

4.6. Збільшення можливого ресурсу роботи експериментальних сепаруючих решіт

Дослідження зносу отворів експериментальних решіт у перерізі показує нерівномірність втрати форми за сторонами (рис. 4.14), що спостерігається і при експлуатації серійних решіт (рис. 4.5). В той час, як профіль на стороні *(А)* досягає граничного зношування, профіль на стороні *(Б)* залишає за собою запас матеріалу на зношування. Тому, для підвищення довговічності решета та відпрацювання повного закладеного ресурсу, необхідно провести його перевертання на 180° (реверс). Виконання даної операції доцільно здійснювати після наробітку дробарки у 750 т.

Отримані зображення відбитків профілів отворів експериментальних сепаруючих решіт після перевертання (реверс) в перерізі представлено на рис. 4.17. Аналіз отриманих профілів при різних наробітках дробарки дає можливість кількісно оцінити поступові зміни форми отворів решета у перерізах після перевертання (вперед стороною *(Б)*). Загальний вигляд профілів та сітка зносу в перерізі отвору представлено на рис. 4.18.

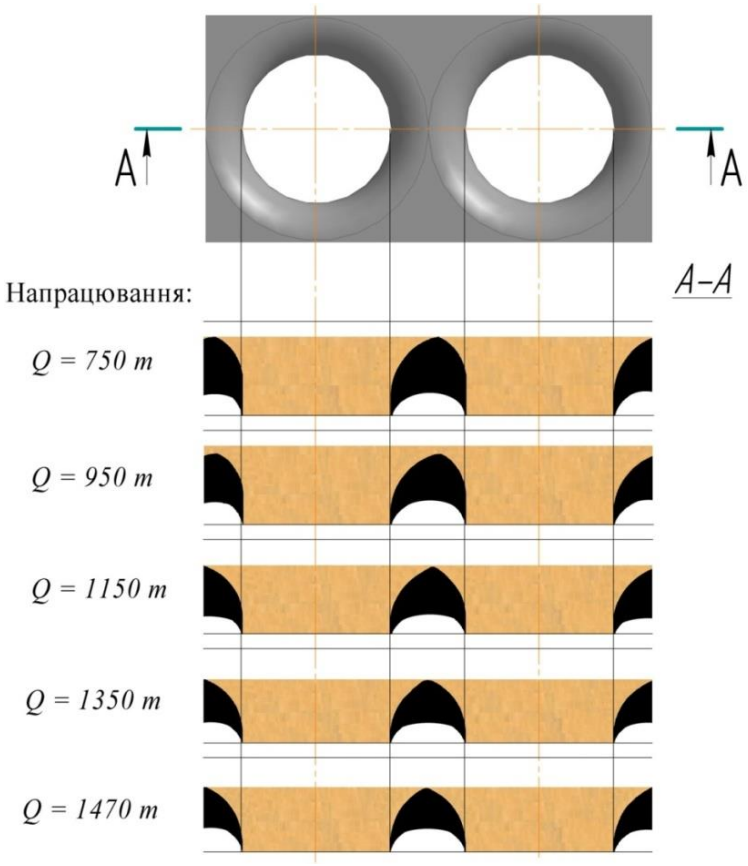


Рис. 4.17. Динаміка зміни форми отворів експериментальних сепаруючих решіт після перевертання на 180° (реверсу)

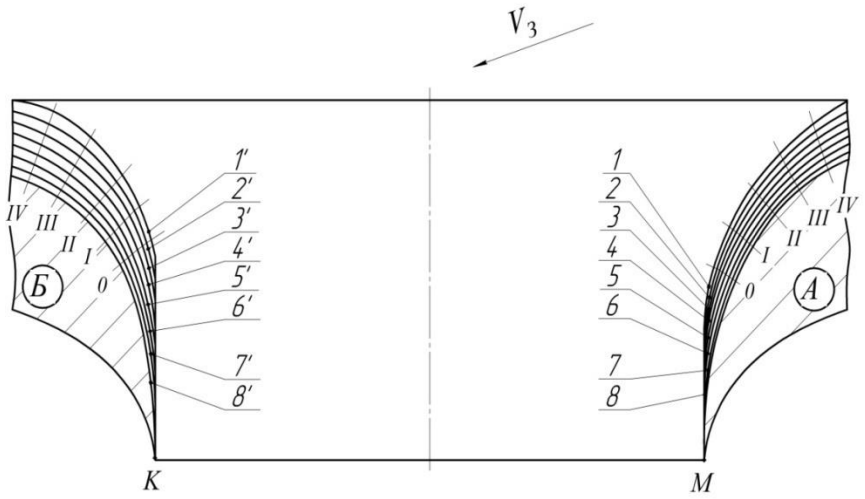


Рис. 4.18. Схема утворення профілів та сітка зносу в перерізі решета з отворами тороїдальної форми після наробітків: 1 – 750 т; 2 – 850 т; 3 – 950 т; 4 – 1050 т; 5 – 1150 т; 6 – 1250 т; 7 – 1350 т; 8 – 1450 т.

Отримані зображення показують, що процес втрати форми на стороні *(Б)* зростає за рахунок силових факторів дії руху потоку зернового матеріалу, а протилежна сторона *(А)* навпаки. Розподіл величин лінійного зношування шляхом визначення товщини втраченого шару матеріалу (Δh) у кожному періоді наробітку після перевертання представлено у додатку З.

Застосування конструктивного методу перевертання решіт на менш зношену сторону, дозволяє досягти граничного зношування (точок *K* і *M*) за сторонами отворів одночасно. Продовження експлуатації призводить до збільшення загального діаметру отворів, що впливає на якість продуктів подрібнення.

Для більш детального аналізу зміни форми отворів з тороїдальною поверхнею, проводимо розрахунок площ втраченого шару матеріалу за сторонами (рис. 4.19), аналогічно як і для серійного. Результати проведених досліджень показують, що розподіл величин в кожному періоді ΔQ є величинами рівними, і на стороні *(А)* становить 0,084 $мм^2$, а на стороні *(Б)* ~ 0,041 $мм^2$ від загальної площі.

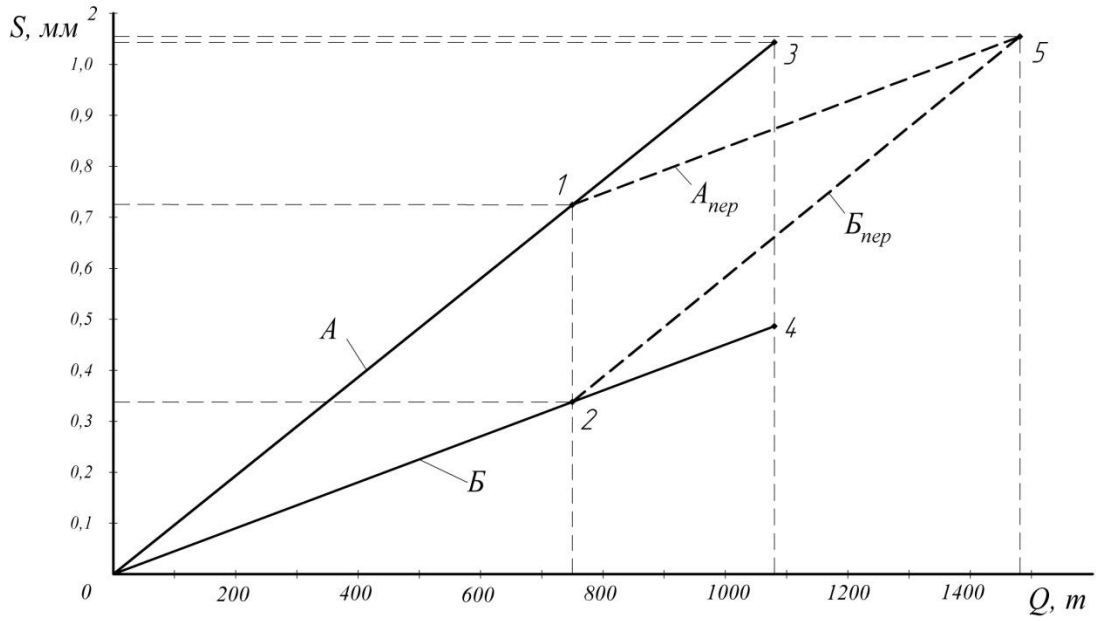


Рис. 4.19. Залежність зміни площі втраченого шару матеріалу в процесі експлуатації експериментальних решіт до і після перевороту на 180° (реверсу): (3-4 – максимальний знос отворів без перевертання решета; 1-2 – оптимальний знос сторін отворів для виконання операції перевертання; 5 – максимальні значення зносу отворів подовженого ресурсу).

Внаслідок перевертання решета на 180° (реверсу) після наробітку 750 т менш зношена сторона *(Б)* займає положення на стороні *(А)* і продовжує зношуватись за параметрами протилежної сторони (рис. 4.19, $Б_{пер}$), і навпаки (рис. 4.19, $А_{пер}$). В результаті цього площі зносу сторін поступово вирівнюються, наближаючись одна до одної. При досягненні граничного зносу решета, сторони *(А)* і *(Б)* отворів втрачають однаковий об’єм матеріалу (рис. 4.19, т. 5), вичерпавши повний свій ресурс.

Виходячи з результатів експериментальних досліджень, проведених в реальних умовах експлуатації, граничне зношування решіт з отворами тороїдальної форми досягається при наробітку в 1470 т просіювання зернової маси. Загальний вигляд зношеного експериментального решета представлено на рис. 4.20. Таким чином, по відношенню до серійного решета довговічність експериментального із зміненою формою отворів підвищена у 1,75 рази.

а б

Рис. 4.20. Зношене експериментальне решето: а – загальний вигляд; б – фрагмент зношеної поверхні.

Отриманий результат показує ефективність застосування решіт з тороїдальною формою отворів близькою до форми природного зношування, яка зберігається впродовж всього терміну експлуатації та забезпечує якісне проходження процесу сепарації. Нова конструкція отворів дозволяє зменшити втрати форми поверхні, збільшуючи термін експлуатації решіт і дробарки в цілому.

4.7. Визначення якості подрібнення зерна дослідними сепаруючими решетами

Дослідженням передбачено вивчення впливу зміни форми отворів серійних та експериментальних решіт на якість подрібнення зерна. Відомо, що якість подрібнення оцінюється середньозваженим розміром частинок – модулем помолу. Науковий та практичний інтерес представляє дослідження розподілу фракційного складу подрібненого зерна, згідно якого і визначається модуль помолу зерна.

Ефективність використання комбікормів у тваринництві залежить від якості подрібнення усіх компонентів, які характеризуються середньозваженим діаметром частинок (модулем помолу). Наявність в

комбікормах великої кількості надмірно подрібненої фракції призводить до зниження засвоєння корму усіх видів тварин на 15–18%.

Згідно ГОСТу 9268 – 90 [141], модуль помолу для відгодівлі ВРХ повинен знаходитись у межах 1,0…1,8 *мм*, відповідає залишку на ситах класифікатора з діаметром отворів 0,2 та 2,0 *мм*. Відповідно до ГОСТу 13496.8–72 [142] частинки, діаметр яких менший 0,2 *мм,* є переподрібненим матеріалом, а більше 2,0 *мм* – недоподрібненим.

Експериментальними дослідженнями якості подрібнення зерна, проведеними відповідно до методики викладеної у підрозділі 3.6, встановлено розподіл крупності частинок за окремими фракціями (рис. 4.21).

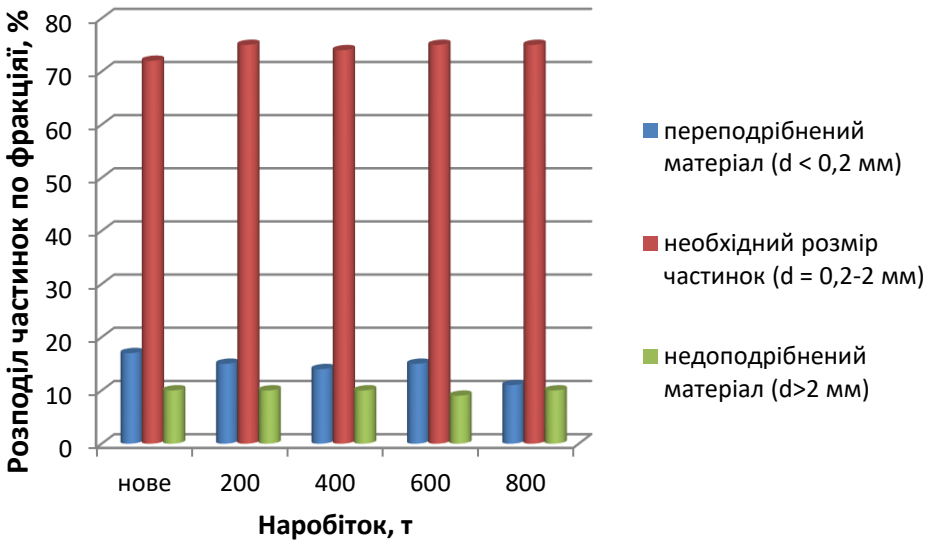


Рис. 4.21. Характеристика продуктів подрібнення зернової маси серійними сепаруючими решетами

Як видно з побудованої залежності, для нових серійних решіт характерний максимум фракційного складу досягається на рівні 0,2-2 *мм* крупності подрібнених частинок. Обробка даних отриманих навісок на ситах класифікатора показала, що середньозважений розмір частинок (модуль помолу) при роботі з новими (незношеними) решетами складає $M_{нов}$= 1,44 *мм*. Це відповідає необхідній якості помолу зерна з домінуючими

фракціями на рівні середнього значення помолу. Крупні частинки розміром більше 3 мм і окремі не подрібнені зерна складають біля 9%, що задовольняє існуючі зоотехнічні вимоги (не більше 10%). Кількість вихідного продукту, який відповідає зоотехнічним вимогам приготування кормів, становить 72%.

Як видно з досліджень, представлених в підрозділі 4.3, зношення серійних сепаруючих решіт суттєво змінює їх форму. Профілі зношування представлені плавними кривими лініями, зображеними на рис. 4.4 та рис. 4.5. Аналіз фракційного складу подрібненої зернової маси для серійного зношеного решета з проведенням операції перевертання на 180° (реверсу) (наробіток Q = 800 т) представлений на рис. 4.21. Кількість частинок на контрольному ситі з розміром, що перевищує 3 *мм*, майже не змінилася і складає 8%, а кількість частинок дрібного помолу – зменшилась.

Розрахунок модуля помолу для зношених серійних решіт показав значення $M_{сер.зн.}$= 1,62 *мм*, що на 18% більше, ніж у нових решіт, і відповідає заданим вимогам – M = 1,4 – 1,8 *мм*. Кількість вихідного продукту необхідного розміру частинок становить 75% від загальної вихідної кількості подрібненого зерна. Утворена зношена форма сепаруючих отворів серійних решіт покращує якість просіяної зернової маси.

При зношуванні експериментальних сепаруючих решіт формуються особливі профілі в перерізі. Порівняльний аналіз якості подрібнення зернової маси зношених (при Q = 1400 т) експериментальних решіт з новими – показав наступні результати. Розподілення фракційного складу подрібненого зерна має тенденцію до групування навколо величин 0,2…2*мм* (рис. 4.22). Модуль помолу для експериментальних зношених решіт згідно проведених дослідів, складає $M_{е.зн}$= 1,62 *мм*. Кількість недоподрібнених зерен складає 8%, а загальна кількість матеріалу, що відповідає вимогам якості подрібнення – 80%.

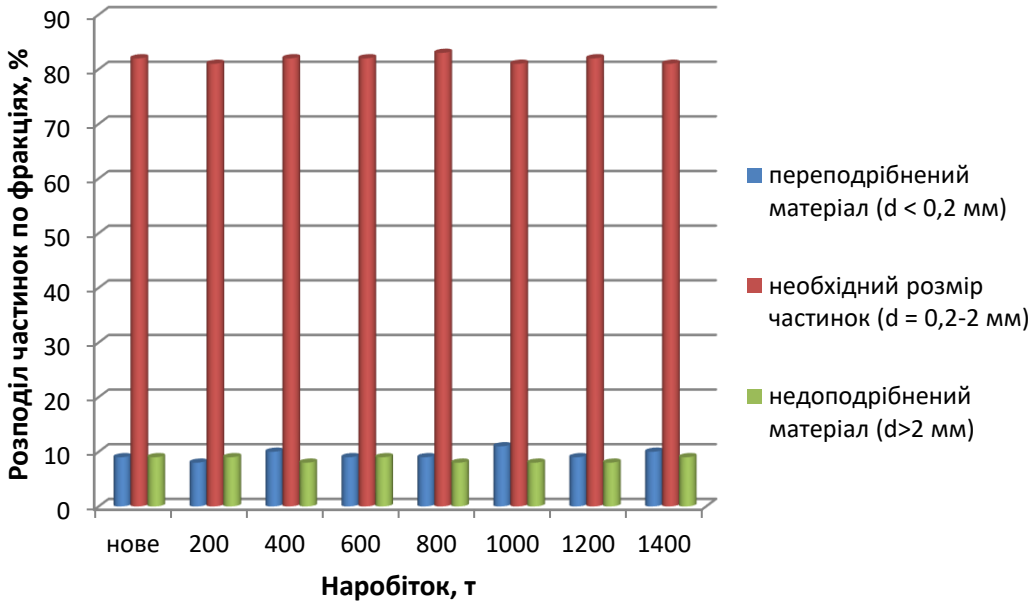


Рис. 4.22. Характеристика продуктів подрібнення зернової маси експериментальними сепаруючими решетами

Аналізуючи одержані результати, можна зробити наступний висновок, що зношування серійних решіт сприяло збільшенню модуля помолу порівняно навіть з новими. Це можна пояснити більш ефективним просіюванням подрібненого зерна зношеними отворами серійних решіт, що утворилися в процесі експлуатації.

Така дія серійних зношених решіт із сформованими, притаманними їм профілями, практично не відрізняється від роботи експериментальних решіт. Отримані дані оцінки якості просіювання підтверджують те, що модуль помолу експериментальними решетами в процесі роботи дробарки залишається практично незмінним. Кількість вихідного продукту, який відповідає зоотехнічним вимогам приготування кормів збільшився на 5% в порівнянні із серійними зразками. Це вказує на кращі показники якості просіювання експериментальними решетами, яким притаманна округлена форма отворів, наближена до форми природного зносу.

Результати експериментальних досліджень якості подрібнення зернової маси серійними та експериментальними сепаруючими решетами в новому та зношеному стані зведені та представлені в таблиці 4.1.

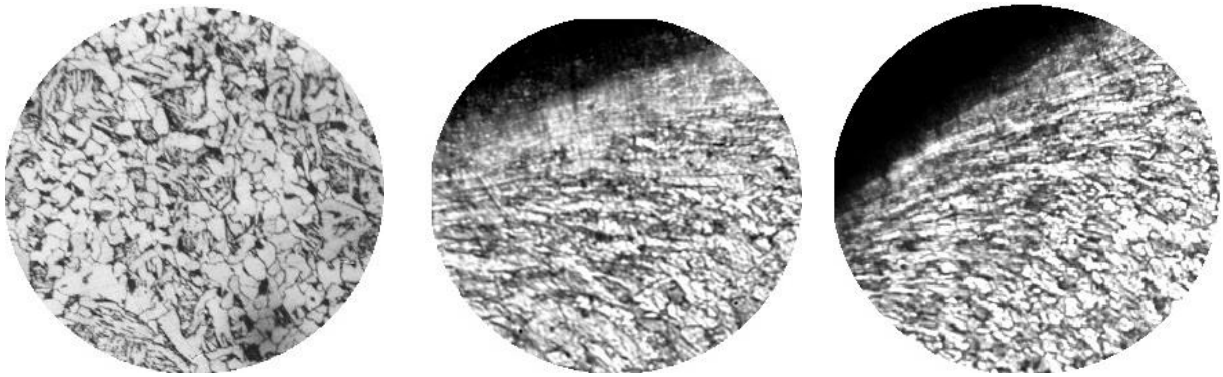
Таблиця 4.1

Результати порівняльних показників випробувань серійних і експериментальних сепаруючих решіт

Показник	Значення показників при використанні сепаруючих решіт			
Фракційний склад для розмірів частинок, *мм*	серійних		експериментальних	
	нових	зношених	нових	зношених
> 0,2	19	16	11	10
0,2 … 1,0	37	39	24	29
1,0 … 2,0	35	36	57	52
2,0 … 3,0	5	5	5	4
< 3,0	4	4	3	4
Модуль помолу, *M*	1,44	1,62	1,58	1,62

4.8. Структура поверхневих шарів металу решіт в процесі експлуатації

Дослідження зміни структури поверхневих шарів при експлуатації серійних та експериментальних решіт проводиться для визначення їх зносостійкості. Це дозволяє отримати структуру основного матеріалу та їх поверхневих шарів. На рис. 4.23, *а* показано мікроструктуру основного матеріалу нових серійних та експериментальних сепаруючих решіт. Структура у поверхневому шарі дослідних решіт представлена рис. 4.23, *б, в*.



а ×400 *б* ×400 *в* ×400

Рис. 4.23. Мікроструктура сталей досліджуваних зразків (Сталь 08кп):

а – основна структура металу в об’ємі; *б* – поверхнева структура металу серійного решета; *в* – поверхнева структура отвору експериментального решета.

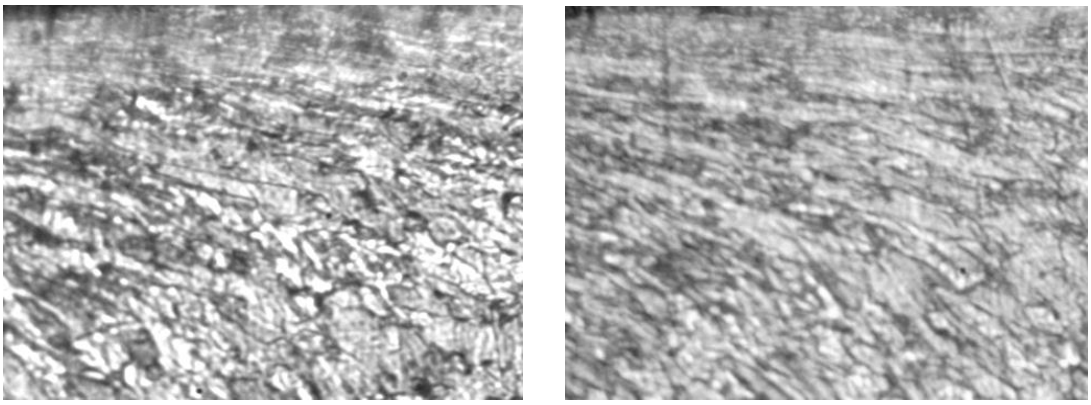
Особливістю структури основного матеріалу решета (*Сталь 08кп)* – є чітка, явно виражена зерниста структура, яка складається на 90% із фериту та незначної кількості перлітних зерен (рис. 4.23, *а*).

Аналізуючи рис. 4.23, *б* – показує формування зерен у поверхневій зоні при виготовлені серійних сепаруючих решіт частково витягнуту структуру на кутовій ділянці отворів. Це пояснюється незначним затягуванням основного матеріалу при прошивання цільного листа пуансоном.

Розглядаючи рис. 4.23, *в* видно, що структура у поверхневому шарі матеріалу на округленій частині отвору експериментальних решіт характеризується збільшеною видовженістю зерен металу решета (*Сталь 08кп)*. Отримана структура, також, пояснюється особливістю виготовлення.

Теоретичні та експериментальні дослідження показали, що в процесі зношування форма отворів змінюється. Найбільш інтенсивно процес зношування протікає на кутовій ділянці отворів серійних решіт, та округлій формі робочих граней отворів експериментальних решіт з поступовим зменшенням по мірі переміщення вглиб матеріалу.

Дослідження структури поверхневих шарів зношених серійних та експериментальних сепаруючих решіт представлено на рисунку 4.24.



а ×400 *б* ×400

Рис. 4.24. Мікроструктура сталей зношених дослідних зразків:
а – поверхнева структура металу зношеного серійного решета; *б* – поверхнева структура отвору зношеного експериментального решета.

На рис. 4.24, *а* видно збільшену видовженість зерен на поверхні серійного зношеного решета в порівнянні із новим (рис. 4.23, *б*). Аналіз рис. 4.23, *б* показує аналогічне формування зерен у поверхневому шарі зношеного експериментального решета, як і у серійного. Отримані зображення свідчить про те, що руйнування решета під дією потоку подрібненого зернового матеріалу свідчить про явище пластичного деформування.

Проводячи додаткові дослідження визначення мікротвердості дослідних решіт за методом Бринеля показав, що твердість матеріалу на поверхні решета до і після експлуатації становить 98 *МПа*. Отриманий результат показує, що деформаційного зміцнення у поверхневому шарі решіт не відбувається, а значить проходить процес пластичного деформування. Підтвердженням чого є значне видовження зерен аустеніту на поверхні решіт. У внутрішніх об’ємах матеріалу решіт особливих змін не відбувається.

Висновки за четвертим розділом

1. Сепаруючі отвори серійних решіт зношуються не рівномірно. Встановлено, що найбільш інтенсивно процес зношування і швидка втрата початкової форми відбувається на кутовій частині отворів.

2. Поверхня тертя решіт має матовий блиск, що супроводжується результатом взаємодії з частинками зерна, наявні подряпини і каверни – від дії твердих включень, що зустрічаються в зерновій масі.

3. Зношування серійних решіт пов’язане зі збільшенням периметру робочої частини отворів та формуванням плавних профілів з поступовим зменшенням їх по мірі переміщення вглиб отвору. Збільшення можливого ресурсу роботи досягається шляхом перевертання його на 180° (реверсу) після наробітку 400 т та підвищує загальний ресурс роботи до 837 т.

4. Сумісне використання конструктивних методів підвищення довговічності сепаруючих решіт, що пов’язані з їх реверсним перевертанням і зміною форми отворів із циліндричної на тороїдальну, приводить до загального підвищення наробітку до відмови на 75%, без втрати функціональних можливостей решета.

5. Решета з отворами тороїдальної форми покращують якість просіювання зернової маси, а кількість вихідного продукту, який відповідає зоотехнічним вимогам приготування кормів, збільшився на 5% в порівнянні із серійними.

6. Структура матеріалу у поверхневих шарах зношених серійних та експериментальних сепаруючих решіт в процесі експлуатації характеризується частковою видовженістю зерен.

РОЗДІЛ 5
ПРОГНОЗОВАНА ЕКОНОМІЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ ВПРОВАДЖЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕНЬ

5.1. Ефективність впровадження результатів досліджень

Розроблений сепаруючий робочий орган з отворами тороїдальної форми, який призначений для всіх видів зернових дробарок із встановленими сепараторами для комбікормових заводів, незалежно від розміру та організаційно-правової форми господарювання.

Для виявлення ефективності результатів досліджень зі застосуванням сепаруючих решіт з отворами тороїдальної форми за базовий робочий орган було прийнято серійні сепаруючі решета, що встановлюються на зернодробарки КДУ-2. Розрахунок економічної ефективності за впровадженням експериментальних решіт у виробництво, здійснено за Національним Стандартом України «Методи економічного оцінювання техніки на етапі випробування» ДСТУ 4397:2005 та у відповідності до Галузевого стандарту України «Методи економічної оцінки техніки для тваринництва» ГСТУ 46.012 – 2000 року [152 – 153].

Виходячи з проведених експериментальних досліджень, наробіток на відмову сепаруючих решіт з отворами тороїдальної форми в середньому зросла в 1,75 рази в порівнянні із серійним (рис. 5.1). Таким чином, економічний ефект від проведеної роботи досягається за рахунок підвищення ресурсу сепаруючих решіт, а значить і дробарки вцілому.

Відповідно до діючої методики [152], необхідна розрахункова кількість сепаруючих решіт та річна трудомісткість технічних обслуговувань по їх заміні представлено у таблиці 5.1.

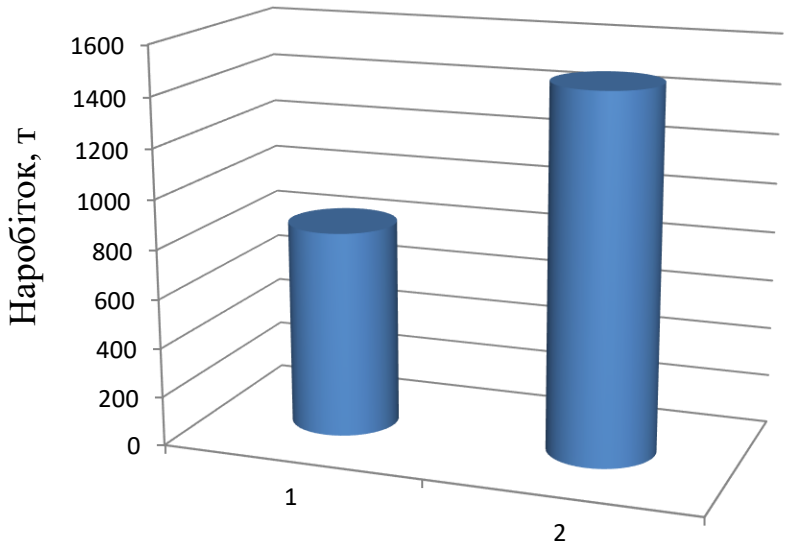


Рис. 5.1. Наробіток сепаруючих решіт до відмови:

1 – серійні решета; 2 – решета з отворами тороїдальної форми.

Таблиця 5.1

Розрахункові дані необхідної кількості сепаруючих решіт і річної трудомісткості технічних обслуговувань по їх заміні

Показник	Сепаруючі решета	
	серійні	з отворами тороїдальної форми
Кількість решіт, шт	10	6
Трудомісткість робіт, люд.год	2,7	1,62

Обслуговування дробарки здійснюється одним працівником, робота тарифікується за третім розрядом.

Внаслідок підвищення довговічності сепаруючих решіт в 1,75 рази в порівнянні з серійними, значно знижується коефіцієнт простою зернодробарки. При цьому підвищується дійсний фонд часу обладнання.

При використанні експериментальних сепаруючих решіт з отворами тороїдальної форми дійсний річний фонд часу зернодробарок зріс з 4536 год до 7560 год, що на 30,24% ефективніше в порівнянні з експлуатацією дробарки оснащеною серійним решетом.

При зростанні дійсного фонду часу, зростає і річна продуктивність зернодробарки. При використанні експериментальних сепаруючих решіт з отврами тороїдальної форми, річний наробіток дробарки КДУ-2,0 зростає з 8112 т до 8320 т, що на 208 т ефективніше в порівнянні з експлуатацією дробарки оснащеної серійним решетом.

5.2. Розрахунок економічної ефективності застосування результатів дослідження

Розрахунок економічної ефективності впровадження результатів досліджень виконана виходячи з отриманих даних експлуатаційних випробувань дослідних та серійних сепаруючих решіт. Розрахунок проводиться у відповідності до ДСТУ 4397:2005, ДСТУ ISO 3310-2:2007 [152, 153].

В основу розрахунку економічної ефективності покладені результати ефективності використання запропонованої конструкції дослідних сепаруючих решіт з тороїдальною формою отворів, близькою до форми природного зношування. Необхідна інформація для економічного розрахунку на одну подрібнювальну машину марки КДУ – 2 з використанням дослідних та серійних сепаруючих решіт зведені в таблицю 5.2.

Результати розрахунку економічних показників серійних та експериментальних сепаруючих решіт з отворами тороїдальної форми, що використовувалася на дробарці КДУ-2, наведені в табл. 5.3.

Таблиця 5.2

Дані для проведення розрахунку економічної ефективності впровадження результатів досліджень

Показник	серійне решето	решето з отворами тороїдальної форми
Продуктивність подрібнення, т/год	3	3
Об’єм зернового бункера, $м^3$	0,08	0,08
Обслуговуючий персонал, чол.	1	1
Час на перестановку решета, год	0,27	0,27
Вартість переробки сировини, грн/кг	0,48	0,48
Збитки від 1 години простою подрібнювачів, грн	1440	1440

Таблиця. 5.3

Економічні показники використання серійних та експериментальних сепаруючих решіт

Тип сепаруючого решета	серійне	з отворами тороїдальної форми
Необхідна річна кількість решіт, шт	11	6
Ціна решета, грн	190	210
Загальна вартість решіт, грн	2090	1260
Річний наробіток дробарки, т	8112	8320
Трудомісткість ТО, люд. год	2,7	1,62
Збитки від простою, грн	3888	2332,8
Річна вартість ТО, грн	57,02	31,1

Виходячи з проведених розрахунків, річний економічний ефект від впровадження сепаруючих решіт з тороїдальною формою отворів складає 2799,92 грн.

Висновки по п’ятому розділу

1. Використання сепаруючих решіт з отворами тороїдальної форми призводить до зниження необхідної річної кількості решіт з 11 до 6 шт. та трудомісткості робіт з їх заміни.
2. Підвищення довговічності сепаруючих решіт знижує коефіцієнт простою дробарки і сприяє зростанню її річного напрацювання до 8320 т.
3. Річний економічний ефект на одну машину від впровадження решіт з отворами тороїдальної форми складає 2799,92 грн.

ВИСНОВКИ

1. Подрібнювальні машини ударної дії для розділення фракцій обладнані решітними сепаруючими робочими органами, ресурс яких нижче загального ресурсу машин. Найбільш перспективним напрямком у підвищенні довговічності решіт слід вважати конструктивні методи, що передбачають пошук нових геометричних форм, які сприяють зменшенню зношування деталей.

2. Наробіток до відмови серійних решіт визначається зміною форми отворів внаслідок їх зношування і досягає свого максимального значення при 600 т подрібненого зерна.

3. Внаслідок нерівномірності зношування сторін отворів максимальний наробіток до відмови серійних решіт може бути збільшеним і досягається при своєчасному їх перевертанні (реверсу). Оптимальний наробіток до перевертання визначається умовою (11), виконання якої означає одночасне повне зношування протилежних сторін отворів. При перевертанні серійного решета після наробітку 400 т, загальний наробіток до відмови збільшився із 600 т до 837 т.

4. Доцільно для підвищення довговічності решіт закладати в початкову конструкцію тороїдальну форму отворів, яка забезпечує мінімальну інтенсивність їх зношування. Параметри тороїдальної форми отворів є: радіус дуги профілю отвору $r = \delta$; запас на зношування $З = \delta$; радіус бокової поверхні отвору $D/2$; радіус зовнішнього кола тороїдальної поверхні $R_З = \delta + D/2$ (рис.6).

5. Експериментальне решето з отворами тороїдальної форми допускає реверсне перевертання для продовження строку експлуатації. Оптимальний наробіток до перевертання складає 750 т, при якому загальний наробіток решета досягає 1470 т.

6. Сумісне використання конструктивних методів підвищення довговічності сепаруючих решіт, що пов’язані з їх реверсним перевертанням

і зміною форми отворів із циліндричної на тороїдальну, приводить до загального підвищення наробітку до відмови на 75%, без втрати функціональних можливостей решета.

7. Модуль помолу решіт з отворами тороїдальної форми знаходиться в допустимих межах M = 1,58-1,62 *мм*, а кількість продуктів подрібнення, збільшуються на 5 % в порівнянні із серійними.

8. Економічний ефект від впровадження сепаруючих решіт з отворами тороїдальної форми складає 2799,92 грн. на одну машину за умови річного навантаження близько 8320 т. Результати досліджень прийнято до впровадження на ПрАТ «Харківпродмаш».

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Погорелый Л. В. Испытание техники для животноводства и кормопроизводства. К. : УСХА, 1991. 389 с.

2. Гернет М. М. Исследования в области динамики мукомольных машин. М., 1953. 346 с.

3. Хусид Д. С. Измельчение зерна. М. : Хлебоиздат, 1958. 248 с.

4. Клименко Н. И., Журавель В. Ф., Тимановский А. В. Экспериментальное определение скорости молотков зерновой дробилки. *Механизация и электрификация сельского хозяйства.* К. : Урожай, 1976. Вып. 35. С. 20 – 24.

5. Макаров А. П. Исследование технологического процесса измельчения фуражного зерна в молотковых дробинках. *Научн. тр. ВИЭСХ*. М. : Колос, 1964. Т. XIV. С. 66 – 88.

6. Храпач В. Е. Экспериментально-теоретическое обоснование технологического процесса измельчения зерна и параметров молотковой дробилки открытого типа : дис. … кандидат технических наук : 05.20.01 / Храпач Владимир Евгеньевич ; Украинская ордена Трудового Красного Знамени сельскохозяйственная академия. К., 1983. 24 с.

7. Алешкин В. Р. Некоторые закономерности прохода частиц через решето молотковой дробилки. *Записки ЛСХИ.* Л., 1968. Вып. 1. Т. 119. 118 с.

8. Мельников С. В. Моделирование рабочего процесса молотковой кормодробилки. *Записки ЛСХИ.* Л., 1968. Вып. 1. Т. 119. 113 с.

9. Ревенко И. И. Распределение перерабатываемого материала в камере измельчителя молотковой дробилки. *Тракторы и сельхозмашины*. 1987. №7. С. 24 – 26.

10. Сыроватка В. И., Алябьев Е. В. Методика проведения испытаний машин для смешивания кормов. М. : Научно-методический отдел ВИЭСХа, 1971. 56 с.

11. Бойко А. І. Повышение долговечности рабочих органов кормоизмельчающих машин конструкторско-технологическими методами : дис. … доктора технических наук : 05.20.03 / Бойко Анатолий Иванович ; НПО по животноводческим машинам (НПО «ВНИИживмаш»). К., 1992. 412 с.

12. Новицький А. В. Підвищення безвідказності кормодробарок конструкторсько-технологічними методами на основі структурного аналізу їх надійності: дис. … кандидата технічних наук : 05.05.11 / Новицький Андрій Валентинович ; Національний аграрний університет. Київ, 2001. 190 с.

13. Бойко А. І., Новицький А. В. Підвищення надійності кормодробарок та подрібнювачів. *Механізація сільськогосподарського виробництва.* К. : НАУ, 1997. Т. ІІІ. С. 6 – 8.

14. Сидашенко А. И. Теоретическое и экспериментальное определение угла отклонения молотка в момент удара о матеріал. *Прогрессивные технологические способы и процессы восстановления деталей с. х. техники.* М. : МИИСП, 1984. С. 37 – 42.

15. Кальбус Г. Л., Моисеев А. А. Иследование эксплуатационной надежности дробарок кормов. *Иследование и конструирование машын и оборудования для животноводства*. К. : ВНИИживмаш, 1975. Вип. 1. С. 163 – 176.

16. Тимоновский А. В., Клименко Н. И., Журавель В. Ф. Сравнительная износостойкость дробильных молотков. *Иследование и конструирование машын и оборудования для животноводства*. К. : ВНИИживмаш, 1975. Вип. 1. С. 165 – 170.

17. Рожковський Н. Ф. Разработка прогрессивной технологии и создание семейства безрешетных молотковых дробилок для измельчения кормовых материалов. *Актуальные вопросы разработки типажа измельчителей и дробилок для кормоприготовления*. К., 1987. С. 17 – 19.

18. Кирпичников Ф. С. Унифицированый ряд дробилок для измельчения зерна и листостебельной массы. К. : ВНИИживмаш, 1980. 117 с.

19. Пилипенко О. М., Гранаткін Ю. Г. Особенности разработки конструкций измельчителей и дробилок кормов. *Актуальные вопросы разработки типажа измельчителей и дробилок для кормоприготовления*. К., 1987. 73 с.

20. Зайцев А. Н., Туриянский Л. И. Разработка блочно-модульных конструкций – перспективное направление в создании измельчителей и дробилок кормов. *Актуальные вопросы разработки типажа измельчителей и дробилок для кормоприготовления*. К., 1987. 73 с.

21. Киреев А. С., Иваненко Г. А., Михалевич Д. С., Лозицкий М. К. Ремонт кормоприготовительных машин. М. : Колос, 1969. 217 с.

22. Заболотских И. Ю., Соболева Н. Н. Результаты исследований физико-механических свойств зерна озимой ржи. *Приоритетные направления научно-технического обеспечения АПК Северо-Востока: Материалы Международная научно-практическая конференция*. Киров, 2005. С. 288 – 294.

23. Завражнов А. И., Николаев Д. И. Механизация приготовления и хранения кормов. М. : Агропромиздат, 1990. 336 с.

24. Маркин О. Ю. Разработка вибрационной дробилки для измельчения зерновых материалов с обоснованием параметров и режимов работы: дис. … кандидата техн. наук: 05.20.01 / Маркин Олег Юрьевич ; Казанская государственная сельскохозяйственная академия. Казань, 1997. 224 с.

25. Крагельский И. В. Дробление зерна при статических и динамических условиях в зависимости от влажности и его размеров. М. : ВИСХОМ, 1937. 218 с.

26. Мельников С. В. Динамические режимы работы молотковых кормодробилок. *Записки Ленинградского с-х института*. Л., 1969. Т. 143. Вып. 2. С. 3 – 8.

27. Демидов А. Р., Чирков С. Е., Глебов Л. П. Определение прочностных характеристик зерна различных культур. *Мукомольно-элеваторная промышленность,* 1971. Вип. №8 С. 58 – 62.

28. Демидов П. Г. Технология комбикормового производства. М. : Колос, 1968. 224 с.

29. ДСТУ 4508: 2005. Комбікорми-концентрати для свиней. Технічні умови. Чинний від 01.01. 2008. К. : Держспоживстандарт України, 2005. 15 с. (Інформація та документація).

30. Подпрятов Г. І. Технологія обробки, переробки зерна та виготовлення хлібопекарської продукції. К. : НАУ, 2000. 126 с.

31. Трисвятский А. А. Хранение и переработка сельскохозяйственного сырья. М. : Агропромиздат, 1991. 422 с.

32. Хрущов М. М., Бабичев М. А. Исследование изнашивания метал лов. М. : АН СССР, 1980. 171 с.

33. Гофман М. С., Шабалин К. Н. О дроблении тел свободным ударом. *Горный журнал*. М. : Недра, 1964. №3. С. 64 – 67.

34. Технология переработки зерна; под ред. Г. А. Егорова. 2-е изд. М. : Колос, 1977. 376 с.

35. Ялпачик О. В., Самойчук К. О., Буденко С. Ф. Моделювання процесів у робочій камері пальцевої зернової дробарки. *Процеси і апарати харчових виробництв*. К. : Наукові праці НУХТ, 2015. Т.1. С. 134 – 141.

36. Шпиганович Т. О., Ялпачик О. В. Дробарка прямого удару з системою сепарування зерна та продуктів подрібнення. *Техніка і технологія АПК : науково-виробничий журнал*. К., 2011. №12 (27). С. 7 – 10.

37. Єгоров Б. В., Давиденко Т. М. Вдосконалення підготовки концентрованих кормів при виробництві повноцінних комбікормів для сільськогосподарських тварин. *Корми і кормовиробництво: міжвідомчий тематичний науковий збірник Ін-ту кормів УААН*. Вінниця, 2008. Вип. 61. С. 135 – 140.

38. Соломка О. В. Аналіз процесу подрібнення зернових матеріалів. *Вісник Харківського національного технічного університету ім. Петра Василенка*. Харків, 2009. Вип. 78. С. 132 – 140.

39. Мельников С. В., Алешкин В. Р., Рощин П. М. Планирование эксперимента в исследованиях сельскохозяйственных процессов. Л. : Колос, 1980. 168 с.

40. Тарутин П. П. Испытание сопротивления зерен пшеницы, раздавленных после облучения ультракороткими волнами. М. : ВНИИЗ, 1979. 50 с.

41. Крагельский И. В. Трение и износ. М. : Машиностроение, 1968. 480 с.

42. Куприц Я. Н. Физико-химические основы размола зерна. М. : Заготиздат, 1946. 213 с.

43. Соломка О. В. Обгрунтування параметрів та режимів роботи ротаційного подрібнювача зерна: дис. … кандидата технічних наук: 05.05.11 / Соломка Олексій Валерійович ; Національний університет біоресурсів і природокористування України. К., 2013. 206 с.

44. Федоров О. С. Повышение эффективности функционирования молотковой дробилки путем совершенствования способа сепарации: дис. … кандидата техн. наук: 05.20.01 / Федоров Олег Сергеевич ; ФГОУ ВПО «Ижевская государственная сельскохозяйственная академия». Ижевск, 2010. 135 с.

45. Кузнецов В. В., Файнгольд Б. Д., Белоглазов В. А. Изнашивание поверхности металлов под действием потока зерна. *Проблемы трения и изнашивания.* К. : Техніка, 1983. № 23. С. 56 – 59.

46. Олексієнко В. О. Підвищення ефективності роботи малогабаритних зернових молоткових кормодробарок: дис. … кандидата технічних наук : 05.05.11 / Олексієнко Вадим Олександрович ; Таврійська державна агротехнічна академія. Мелітополь, 2006. 173 с.

47. Мельников С. В. Механизация и автоматизация животноводческих ферм. Л. : Колос, 1978. 560 с.

48. Алешкин В. Р., Рощин П. М. Механизация животноводства. М. : Агропромиздат, 1985. 336 с.

49. Подпрятов Г. І. Технологія обробки, переробки зерна та виготовлення хлібопекарської продукції. К. : НАУ, 2000. 126 с.

50. Трисвятский А. А. Хранение и переработка сельскохозяйственного сырья. М. : Агропромиздат, 1991. 422 с.

51. Виноградов В. Н., Сорокин Г. М., Колокольников М. Г. Абразивное изнашивание. М. : Машиностроение, 1990. 221 с.

52. Сорокин Г. М. Трибология сталей и сплавов. М. : Надра, 2000. 317 с.

53. Клейс И. Р. Основы выбора материалов для работы в условиях бразивного изнашивания. *Трение и износ*. М., 1980. Т.1. №2. С. 263 – 271.

54. Клейс И. Р., Ууэмыйс Х. Х. Новые механические установки для исследования абразивной эрозии. *Вестник машиностроения*. М., 1971. № 3. С. 13 – 15.

55. Ууэмыйс Х. Х., Балбат А. Т. О влиянии добавок на интенсивность измельчения робочих органов ударных измельчителей. *Сб. трудов НИПИсиликатобетона*. Таллин, 1973. № 7. С. 109 – 122.

56. Ууэмыйс Х. Х., Балбат А. Т., Тадольдер Ю. А. Исследование влияния сухой добавки и воды на интенсивность изнашивания некоторых технически чистых металлов. *Труды Таллин. Политехн. Института*. Таллин: Машиностроение, 1980. № 478. С. 25 – 30.

57. Лангенберг И., Клейс И. Исследование первичных следов при абразивной эрозии. *Абразивная эрозия стали. Сборник НИПИ*. Таллин: Силикатобетон, 1968. С. 85 – 91.

58. Кащеев В. Н. Абразивное разрушение твердых тел. М. : Наука, 1970. 270 с.

59. Мельников С. В., Плохов Ф. Г. Исследование процесса разрушения зерна ударом. *Записки ЛСХИ,* 1967. Вып. 2. Т. 108. С. 212 – 218.

60. Сыроватка В. И., Рыжов С. Оборудование и технические средства для приготовления комбикормов. *Комбикормовая промышленность*. 1997. №5. С. 12 – 15.

61. Борщев В. Я. Оборудование для измельчения материалов: дробилки и мельницы. Тамбов: Изд-во Тамбовского гос. техн. ун-та, 2004. 92 с.

62. Осьмак В. Сучасний стан та перспективи розвитку машин для кормо виробництва. *Збірник наукових праць УкрНДІЛВТ ім. Л. Погорілого.* Дослідницьке, 2009. Вип. 13. С. 259 – 261.

63. Завражнов А. И., Николаев Д. И. Механизация приготовления и хранения кормов: Учебное пособие для студентов высших учебных заведений. М. : Агропромиздат, 1990. 336 с.

64. Технологічне обладнання зернопереробних та олійних виробництв: Навч. посібник / Дацишин О. В., Ткачук А. І., Гвоздев О. В., Ялпачик Ф. Ю, Гвоздев В. О. ; за ред. О. В. Дацишина. Вінниця: Нова Книга, 2009. 488 с.

65. Хащин С. М. Рынок научно-технической продукции: Учебное пособие. Ростов-на-Дону: ДГТУ, 1999. С. 64.

66. Лебедев А. Т., Цховребов В. С., Симоновский А. Я. Износостойкость рабочих органов молотковых дробилок для кормления животных. *Вестник АПК Ставрополья*. Ставрополь, 2012. №3(7). С. 50 – 52.

67. Механізація виробництва продукції тваринництва / Ревенко І. І., Кукта Г. М., Манько В. М. та ін. ; за ред. І. І. Ревенка. К. : Урожай, 1994. 264 с.

68. Каталог продукції віртуальної виставки «Нестор». URL: http://www.nestorexpo.com/belagro/index.pl?act=PRODUCTS&actid=oborudovanie+dlya+proizvodstva+kombikorma (дата звернення: 18.02.2014).

69. Продукція компанії ООО «МикоТрейд». URL: http://himel.prom.ua/p27376942-zernodrobilka-himel-serii.html (дата звернення: 20.02.2014).

70. Каталог продукції компанії «KITTRADE». URL: http://www.kittrade.com.ua/?page=zernodrobilki/zernodrobilki (дата звернення: 20.02.2014).

71. Животноводческие машины за рубежом: Каталог ; под ред. Ткач В. Д. К. : Выпуск НПО ВНИИживмаш, 1987. №1. 86 с.

72. Інформаційний сайт «AGROSERVER». URL: http://www.agroserver.ru/b/drobilka-molotkovaya-molot-5000-250892.htm (дата звернення: 20.02.2014).

73. Інформаційний сайт «DOZAAGRO». URL: www.dozaagro.ru (дата звернення: 20.02.2014).

74. Ревенко І. І., Брагінець М. В., Заболотько О. О. Машини та обладнання для тваринництва. К. : Кондор, 2011. 396 с.

75. Каталог продукции компании ОАО «Слободской машиностроительный завод». URL: http://www.smsz.ru/products/g_kombikorm/ (дата звернення: 20.02.2014)

76. Поярков М. С. Совершенствование рабочего процесса молотковых дробилок с жалюзийными сепараторами при одно- и двухступенчатом измельчении зерна : дис. … кандидата техн. наук: 05.20.01 / Поярков Михаил Сергеевич ; Вятская государственная сельскохозяйственная академия. Киров, 2001. – 253 с.

77. Гвоздєв О. В., Шпиганович Т. О., Ялпачик О. В. Вдосконалення процесу подрібнення зерна. *Збірник наукових праць Вінницького національного аграрного університету. Серія: технічні науки*. Вінниця, 2011. №9. С. 143 – 150.

78. Лебедев А. Т., Макаренко Д. И., Каа А. В., Шумский А. С. Надежность процесса измельчения зерновых материалов, используемых для

кормления животных. *Вестник АПК Ставрополья*. Ставрополь, 2012. №1(5). С. 29 – 31.

79. Денисов В. А., Вараксин И. И. Теоретические предпосылки измельчения зерна с предварительным разделением его по физико-механическим свойствам на фракции. *Механизация процессов в животноводстве и кормопроизводстве*. Пермь, 1983. С. 112 – 120.

80. Черепанов С. В., Карпушенко В. О., Архипова М. В. Современные технологии дробления: от идеи до воплощения. *Хранение и переработка зерна.* Суми, 2004. №1. С. 37 – 38.

81. Лебедев А. Т. Основные направления повышения эффективности технологических процессов. *Техника в сельском хозяйстве: научно-технический журнал.* 2011. №6. С. 3 – 5.

82. Пат. 95435 Україна, МПК A23N 5/00, B02C 13/00. Пристрій для лущення та подрібнення зерна / Т. О. Шпиганович, О. В. Ялпачик; заявник і патентовласник Таврійський державний агротехнологічний університет. №200910980, заявл. 6.04.2010; опубл. 25.07.2011, Бюл. №14.

83. Пат. 61505 Україна, МПК B 02B3/02. Спосіб лущення зерна та пристрій для його здійснення / Ф. Ю. Ялпачик, Н. О. Фучаджи, О. В. Гвоздєв; заявник і патентовласник Таврійський державний агротехнологічний університет. №200910980, заявл. 17.02.2003; опубл. 17.11.2003, Бюл. №11.

84. Шпиганович Т. О., Ялпачик О. В. Обґрунтування конструктивних параметрів дробарки зерна прямого удару з попередньою сепарацією зернового матеріалу. *Праці Таврійського державного агротехнологічного університету.* Мелитополь: ТДАТУ, 2010. Вип. 10. Т.3. С. 23 – 35.

85. Продукція компанії ТОВ «Агропродажа». URL: http://u.agroprodazha.agronationale.com.ua/goods/ovs-25_ochischuvach_oberemka_samoperesuvniy_zernoochistitel-2801.html (дата звернення: 04.04.2014).

86. Продукція компанії ООО «БелМельАгромаш». URL: http://www.l-groop.com/index.php?productID=11739 (дата звернення: 05.04.2014).

87. Продукція компанії «Агромаш». URL: http://www.agromash-nn.ru/prod/separat/separatory/bis_bls/ (дата звернення: 02.04.2014).

88. Продукція агропромислового серверу «Агросервер». URL: http://www.agroserver.ru/b/universalnye-vibrotsentrobezhnye-zernovye-separatory-btss-25-b-336886.htm (дата звернення: 15.01.2014).

89. Продукція «МАШСТРОЙ ХОЛДИНГ». URL: http://машстрой-холдинг.рф/tech/stat-zerno-tehnika/mzs-25/ (дата звернення: 14.12.2013).

90. Савченко В. М. Розробка молотків кормодробарок з локальним зносостійким покриттям: автореф. дис. … канд. техн. наук: 05.05.11 / Василь Миколайович Савченко ; Кіровоградський національний технічний університет. Кіровоград, 2008. 20 с.

91. Продукція ПАО «Завод Фрунзе». URL: http://www.frunze.ua/ua/catalog/resheto.html (дата звернення: 12.06.2014).

92. Сухенко Ю. Г., Сухенко В. Ю., Хоменко С. В. Підвищення довговічності робочих органів дробарок для зерна. *Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України*. К. : НУБіП Украни, 2010. Вип. 144. Ч.5. С. 260 – 267.

93. Новицький А. В. Оцінка надійності засобів для приготування і роздавання кормів в залежності від умов і режимів експлуатації. *Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України*. К. : НУБіП Украни, 2015. Вип. 253. С. 141 – 148.

94. Справочник механизатора-животновода / Мартынов В. М., Уткин А. А., Широков Ю. А. ; сост. Л. И. Киренков. М. : Россельгозиздат, 1985. 366 с.

95. Новицький А. В., Ружило З. В. Аналіз відмов засобів для приготування і роздавання кормів. *Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України*. К.: НУБіП Украни, 2015. Вип. 253. С. 253 – 259.

96. Зверев С. В., Глебов Г. А., Ляшенко Б. А. Повышение ресурса, работы комплекта молотков дробилок. М., 1988. 150 с.

97. Пилипенко А. Н., Клименко Н. Н., Тимановский А. В., Журавель А. Ф. Устранение неравномерности износа молотков кормодробилок. *Механизация и электрификация социалистического сельського хозяйства*. 1977. №9. С. 10 – 12.

98. Ревенко И. И. Распределение перерабатываемого материала в камере измельчителя молотковой дробилки. *Тракторы и сельхозмашины*. – К., 1987. №7. С. 24 – 26.

99. Мельников С. В., Андреев П. В. Механизация технологических процессов. М. : Агропромиздат, 1990. 287 с.

100. Роговский Л. Л., Сокол А. Н., Остапенко Г. И. Оценка параметров, влияющих на износ молотков дробилок. *Совершенствование процесов и рабочих органов с.-х. машин, орагнизация и технология ремонта сельхозмашин*. К. : УСХА, 1982. С. 104 – 107.

101. Гук Ю. Б. Анализ надежности электроэнергетических установок. М. : Энергоатомиздат, 1988. 328 с.

102. Демидов П. Г. Технология комбикормового производства. М. : Пищепромиздат, 1954. 328 с.

103. Моисеев А. А. Кормодробилки служат дальше. *Техника в сельском хозяйстве.* 1980. №3. С. 28 – 29.

104. Ялпачик Ф. Ю., Олексієнко В. О. Кормодробарка для сімейної ферми. *АПК: наука, техника, практика*. К., 1989. №3. С. 22 – 23.

105. Ялпачик Г. С., Ялпачик Ф. Е. Кормоизмельчающие молотковые аппараты с режущими элементами. *Совершенствование машин и механизмов при производстве продуктов растениеводства*. К. : УСХА, 1985. С. 134 – 142.

106. Рожківський М. Ф. Розробка наукових основ, створення і впровадження прогресивних технологій та комплексу машин нового покоління. *Механізація та електрифікація сільського господарства.* – Глеваха: ННЦ «ІМЕСГ», 2006. Вип. 90. С. 324 – 338.

107. Машини та обладнання переробних виробництв: Навчальний посібник / Дацишин О. В., Ткачук А. І., Чубов Д. С. та ін. ; за ред. О. В. Дацишин. К. : Вища освіта, 2005. 159 с.

108. Коруняк П. С. Обгрунтування схем і параметрів устаткування ударного подрібнення зерна: автореф. канд. техн. наук: 05.05.11 / Петро Степанович Коруняк ; Львівський державний аграрний університет. Львів, 2000. 20 с.

109. Рожківський М. Ф. Нове покоління молоткових дробарок. *Техніка АПК.* 2000. №1. С. 12 – 14.

110. Макаров А. П. Исследование технологического процесса измельчения фуражного зерна в молотковых дробинках. *Научные труды ВИЭСХ*. М. : Колос, 1964. Т. XIV. С. 66 – 88.

111. Макаров А. П. Энергетика процесса дробления фуражного зерна. *Науч. тр. ВИЭСХ*, 1959. Т. 4. С. 11 – 12.

112. Сидашенко А. И., Скобло Т. С. Анализ причин преждевременного износа и разрушения деталей машин сельскохозяйственной техники. *Технічний сервіс агропромислового, лісового та транспортного комплексів*. Харків, 2014. №1. С. 105 – 113.

113. Киреев А. С., Иваненко Г. А., Михалевич Д. С., Лозицкий М. К. Ремонт кормоприготовительных машин. М. : Колос, 1969. 217 с.

114. Пат. 82751 Україна, МПК B02C 9/00, B02C 12/284, B02C 13/14. Дробарка / М. І. Карпенко; заявник і патентовласник Карпенко Микола Іванович. №a200607961, заявл. 14.07.2006; опубл. 12.05.2008, Бюл. №9.

115. Пат. 44123 Україна, МПК B02C 13/06. Дробарка зернових матеріалів / Я. А. Кузьміч, В. І. Дешко, В. В. Ткач, І. Я. Добрянський, І. В. Абрамов; заявник і патентовласник Національний науковий центр «Інститут механізації та електрифікації сільського господарства» Української академії аграрних наук. №2001053195; заявл. 14.05.2001; опубл. 15.01.2002, Бюл. №1.

116. Пат. 66833 Україна, МПК B02C 13/13, B02C 13/04, B02C 13/284. Дробарка ударної дії / В. Є. Храпач, Є. І. Храпач; заявник і патентовласник Храпач Володимир Євгенійович. №2000074458; заявл. 25.07.2000; опубл. 15.02.2002, Бюл. №2.

117. Моисеев А. А., Тененбаум Л. В., Кратковский Г. И. Исследование изнашивания материалов в потоке измельченного зерна. *Исследование и конструирование машин и оборудования для животновства*. К. : ВНИИживмаш, 1975. Вып.1. С. 185 – 187.

118. Пат. 2273520 Российская Федерация, МГЖ B02C 13/02. Дробилка / Н. Ф. Баранов, О. В. Пивоваров №2004129406/03; заявлено 05.10.2004; опубл. 10.04.2006, Бюл. №10.

119. Пат. 2520653 Российская Федерация. Молотковая дробилка / А. В. Черепков, И. В. Коношин. №2012149728/13, заяв. 21.11.2012; опубл. 27.06.2014, Бюл. №18.

120. Пат. 2287371 Российская Федерация. Молотковая дробилка / А. В. Звеков, И. В. Коношин. №2005109616/03, заяв. 04.04.2005; опубл. 20.11.2006.

121. Сыроватка В. И. Основные закономерности процесса измельчения зерна в молотковой дробилке. *Электрификация сельського господарства.* Труды ВИЭСХ, 1964. №4. С. 89 – 157.

122. Пат. 49573 Україна, МПК B02C 13/00. Дробарка молоткова / С. І. Шмат, П. Г. Лузан, Ю. В. Мачок, К. Д. Матвєєв, О. Р. Лузан; заявник і патентовласник Кіровоградський національний технічний університет. №u200912028; заявл. 23.11.2009; опубл. 26.04.2010, Бюл. №8.

123. Пат. 20890A Україна, МПК B02C 9/00. Молоткова дробарка / В. Г. Погрібний, В. О. Таранюк; заявник і патентовласник Погрібний Володимир Григорович, Таранюк Віталій Олексійович. №96124831; заявл. 24.12.1996; опубл. 07.10.1997, Бюл. №0.

124. Пат. 33720 Україна, МПК B02C 13/00. Молоткова дробарка зернових кормів / І. І. Ревенко, Ю. І. Ревенко; заявник і патентовласник

Національний аграрний університет. №u200802455; заявл. 26.02.2008; опубл. 10.07.2008, Бюл. №13.

125. Колчин Н. И. Механика мишин. Л. : Машгиз, 1962. Т.1. 550 с.

126. Машков Ю. К. Расчет и повышение долговечности сферических сопряжений. *Вестник машиностороения*. М., 1976. №11. С. 28 – 30.

127. Тескер Е. И., Иваниди С. Б. Повышение долговечности шестерен коробок передач путем изменения геометрии торцов зубьев. *Вестник машиностороения*. М., 1984. №1. С. 19 – 20.

128. Решетов Д. Н. Работоспособность и надежность деталей машин. М. : Высшая школа, 1974. 206 с.

129. Дикер Я. И., Сагин Л. И. Основы производства червячных глобоиных передач. М. : Машгиз, 1960. 203 с.

130. Зак П. С. Глобоидная передача. М. : Машгиз, 1962. 256 с.

131. Рабинович А. Ш. Самозатачивающиеся плужные лемехи и другие почворежущие детали машин. М. : ГОСНИТИ, 1962. 106 с.

132. Михеев И. Н., Огородников С. П. Некоторые закономерности процесса деформирования связных грунтов при резании. *Изв. вузов. Строительство и архитектура*, 1979. №1. С. 118 – 121.

133. Цытович Н. А. Механика грунтов. М. : Высшая школа, 1979. 272 с.

134. Харьковський І. С. Розробка зміцнених наральникових сошників сівалок для технологій мінімального обробітку грунту: автореф. дис. … канд. техн. наук: 05.05.11 / Ігор Сергійович Харьковський ; Національний аграрний університет. Київ, 2007. 20 с.

135. Саінсус О. Д. Підвищення довговічності лап культиваторів композиційними покриттями перемінного складу: автореф. дис... канд. техн. наук: 05.05.11 / Олександр Дмитрович Саінсус ; Кіровоградський національний технічний університет. Кіровоград, 2008. 20 с.

136. Балабуха О. В. Підвищення довговічності і ефективності роботи ріжучих елементів грунтообробних машин шляхом управління

спрацюванням при дискретному зміцненні: Автореф. дис... канд. техн. наук: 05.05.11 / Олександр Валерійович Балабуха ; Кіровоградський державний технічний університет. Кіровоград, 2001. 17 с.

137. Проников А. С. Методика расчета сопряжений на изнашивание на пимере не центрально нагруженных дисков. *Основные вопросы надежности и долговечности машин*. М. : МАТИ, 1969. С. 107 – 134.

138. Проников А. С. Методы расчета машин на износ. *Расчетные методы оценки трения и износа*. Брянск : Приокское кн. изд., 1975. С. 48 – 98.

139. Проников А. С. Основные вопросы расчета и проектирования долговечныхмашин. *Трение и износ в машинах*. М. : Изд. АН СССР, 1960. Т.1. С. 63 – 69.

140. Розенбаум А. Н., Тенненбаум М. М. Оптимизация конструктивных параметров изнашивающихся деталей машин. *Тракторы и сельхозмашини.* М., 1973. №7. С. 37 – 39.

141. Ревенко Ю. І. Удосконалення технологічного процесу і агрегату для приготування комбікормів в умовах господарств: Автореф. дис... канд. техн. наук: 05.05.11 / Юлій Іванович Ревенко ; Національний аграрний університет. К., 2007. 22 с.

142. Шульц В. В. Теория надежности машин. Л. : ЛИСИ, 1983. 75 с.

143. Шульц В. В. Устойчивость формы изнашивающийся поверхности вращения. *Надежность и долговечность машин*. Л. : ЛИСИ, 1973. №79. С. 40 – 50.

144. Шульц В. В. Форма естественного износа деталей машин и инструмента. Л.: Машиностроение, 1990. 208 с.

145. Машини, обладнання та їх використання в тваринництві: методичні вказівки / Таврійський державний агротехнологічний університет, 2012. 50 с.

146. ДСТУ 4397: 2005. Сільськогосподарська техніка. Методи економічного оцінювання техніки на етапі випробовування. Чинний від 28.04.2005. К. : Держспоживстандарт України, 2005. 16 с. (Національний стандарт України).

147. Інформаційний сайт ООО «ВП Дилис». URL: http://dilis.prom.ua/p20916673-vlagomer-zerna-semyan.html (дата звернення: 23.07.2015).

148. ДСТУ 4120-2002. Комбікорми повнораціонні для сільськогосподарської птиці. Технічні умови. Чинний від 01.04.2003. К. : Держспоживстандарт України, 2003. 16 с. (Національний стандарт України).

149. ГОСТ 9268-90. Комбикорма-концентраты для крупного рогатого скота. Технические условия. Чинний від 01.02.2002. М. : Изд-во стандартов, 1991. 10 с. (Межгосударственный стандарт).

150. ГОСТ 13496.8-72. Комбикорма. Методы определения крупности размола и содержания неразмолотых семян культурных и дикорастущих растений. Чинний від 04.04.2011. М. : Стандартинформ, 2011. 4 с. (Межгосударственный стандарт).

151. Інформаційний сайт «Electronoff». URL: http://electronoff.ua/good/vesy-kuhonnye-sf-400-7000g-1.php (дата звернення: 11.10.2015).

152. ДСТУ 4397-2005. Сільськогосподарська техніка. Методи економічного оцінювання техніки на етапі випробування. Чинний від 28.04. 2005. К. : Держспоживстандарт України, 2005. 13 с. (Національний стандарт України).

153. ДСТУ 3310-2:2007. Решета і сита контрольні. Технічні вимоги та методи випробувань. Частина 2. Решета контрольні з перфорованих металевих пластин (ISO 3310-2:1999). Чинний від 01.04.2010. К. : Держспоживстандарт України, 2010. (Національний стандарт України).

154. Remeira V., Emeneau B., Simmons J. Computerized production scheduling at LASCO – An expert system approach. *Izon and steel Engineer*. 1991. №9. p. 16 – 19.

155. Zhang S. W. State of the art of polymer tribology. *Tribology Litteras*. 1998. №2. p. 49 – 60.

156. Nikolov S. Modeling and simulation of particle breakage in impact crusher. *International journal of mineral processing.* 2004. 74. p. 219 – 225.

157. M. Lindqvist, Wear in cone crusher chambers. Thesis. *Chalmers University of Technology*. Sweden, 2005. p. 1 – 44.

158. Tihanov D., Binchiciu E., Florea C., Geanta V., Binchiciu H. Research regarding wear protection in sever exploitation condition of crusher jaws. *Advanced Materials Research*. 2015. Vol. 1128, p. 390 – 393.

159. P. Svedensten. Crushing plant performance. Thesis, Chalmers University of Technology. Sweden, 2007. p. 1 – 82.

ДОДАТКИ

Додаток А

УКРАЇНА

ПАТЕНТ

НА КОРИСНУ МОДЕЛЬ

№ 96341

РЕШІТНА ДРОБАРКА

Видано відповідно до Закону України "Про охорону прав на винаходи і корисні моделі".

Зареєстровано в Державному реєстрі патентів України на корисні моделі **26.01.2015.**

Голова Державної служби
інтелектуальної власності України А.Г. Жарінова

Державна служба інтелектуальної власності України
Ідентифікаційний код 37552556
№1

ДЕРЖАВНА СЛУЖБА ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ ВЛАСНОСТІ УКРАЇНИ

УКРАЇНА (19) **UA** (11) **96341** (13) **U**

(51) МПК
B02C 13/284 (2006.01)

(12) ОПИС ДО ПАТЕНТУ НА КОРИСНУ МОДЕЛЬ

(21) Номер заявки: **u 2014 10222**
(22) Дата подання заявки: **18.09.2014**
(24) Дата, з якої є чинними права на корисну модель: **26.01.2015**
(46) Публікація відомостей про видачу патенту: **26.01.2015, Бюл.№ 2**

(72) Винахідник(и):
Бойко Анатолій Іванович (UA),
Морозовська Зоя Анатоліївна (UA)
(73) Власник(и):
Бойко Анатолій Іванович,
вул. А. Ахматової, 8, кв. 122, м. Київ, 02068 (UA),
Морозовська Зоя Анатоліївна,
вул. Ломоносова, 63, м. Київ, 03022 (UA)

(54) РЕШІТНА ДРОБАРКА

(57) Реферат:

Решітна дробарка для зерна містить сепаруючий елемент у вигляді решета, що має вигляд прямокутного полотна з круглими наскрізними отворами. Отвори для підвищення довговічності виконані по вгнутій поверхні, наближеної до тороїдальної форми природного їх зносу.

UA 96341 U

Корисна модель належить до області подрібнення і сепарації зернових матеріалів і може бути ефективно використана на приготування концентрованих та комбінованих кормів для сільськогосподарських тварин і птиці безпосередньо в господарствах, а також може знайти своє застосування у харчовій промисловості та у будівельній, хімічній та інших галузях промисловості.

Найбільш близьким аналогом по конструкції є дробарка зернових матеріалів [МПК B02C 13/04 Бюл. № 9, 2011 р.], яка включає в себе: циліндричний корпус, встановленим в корпусі ротором, на якому рядами шарнірно закріплюються подрібнювальні молотки, решето та рифлені деки.

Недоліком робочих органів такої дробарки є те, що під час процесу подрібнення продукту відбувається інтенсивне спрацювання молотків, а також граней отворів сепаруючого решета. Це, в подальшому, призводить до збільшення розмірів отворів та погіршення подрібнення, сепарації зернової суміші.

Виправлення його помилок досягається шляхом встановлення додаткових молотків для притискання маси до решета, а за ними йде пара молотків, що служить розбивачами для зерна. Це може призвести до забивання отворів решета та поганого проходження маси.

Задача, на вирішення якої спрямовано запропоноване решето, полягає у підвищенні надійності та інших параметрів дробарки за рахунок додаткових напрацювань до повної його відмови.

Задача вирішується встановленням у камеру подрібнення удосконаленого решета, форма отворів якого має вгнутий вигляд, виконана по тороїдальній формі, наближеної до природного їх зносу.

На фіг. 1 показано вид подрібнювальної камери дробарки в розрізі. Фіг. 2 зображено елемент решета в перерізі А-А.

Робоча камера дробарки для подрібнення зернової маси складається із циліндричного корпусу 1, з встановленим в корпусі ротором 2, на якому рядами шарнірно закріплюються подрібнювальні молотки 3. На виході з робочої зони знаходиться удосконалене решето 4, яке виконане з наскрізними отворами діаметром D, що мають вигнуту назовні форму (фіг. 2) для підвищення довговічності сепаруючого решета та кращого проходження зернового матеріалу, а також для збільшення продуктивності дробарки.

Підвищення довговічності запропонованого решета в порівнянні із серійним, обладнаний отворами циліндричної форми і пояснюється наступним чином. Краї циліндричного отвору мають прямокутну форму, що внаслідок крайових ефектів взаємодії із зерновою масою більш інтенсивніше зношується ніж на інших ділянках решета. У міру зношування прямокутні краї округлюються, утворюючи тороїдальну поверхню. Тиск зернової маси на тороїдальну поверхню отвору у міру її розвитку знижується, що приводить до зменшення інтенсивності зношування.

В запропонованому решеті сепаруючі отвори конструктивно з самого початку виконуються по тороїдальній формі природного зношування, що знижує інтенсивність його протікання внаслідок чого підвищується довговічність решіт.

Решето разом із внутрішньою рифленою декою 5 складає нерухому робочу поверхню та одночасно використовується для доподрібнення та виведення готової сировини з робочої зони дробарки.

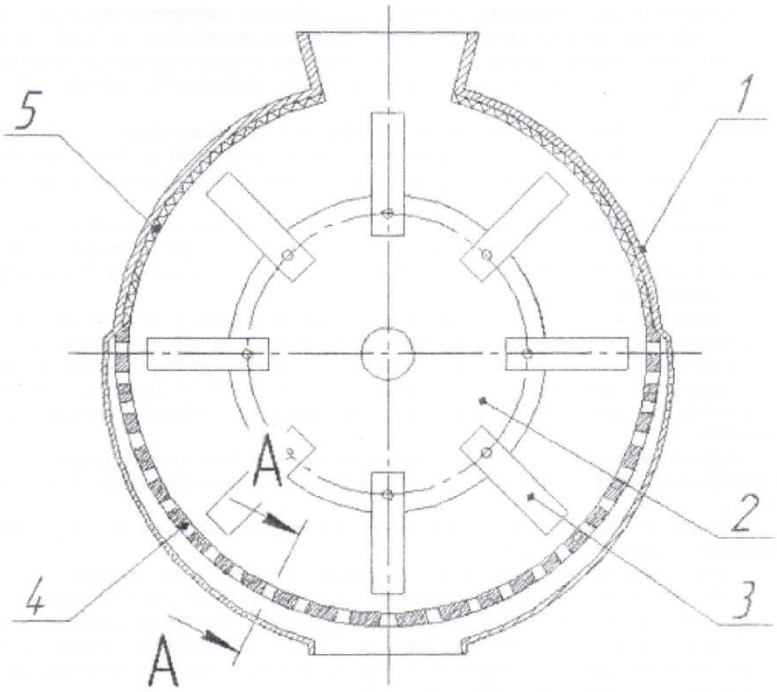
Процес подрібнення відбувається наступним чином.

Продукт надходить у робочу зону дробарки, де в першу чергу піддається дії молотків 3, які з необхідною швидкість наносять удари і руйнують зерно. При цьому зерно подрібнюється на частинки та направляється на внутрішню поверхню робочої камери 1. Частинки, що досягають потрібної фракці, проходять крізь отвори решета 4 та виводяться із робочої зони як готовий продукт, а недоподрібнений матеріал відбивається і знову захоплюється молотками 3 для повторного циклу подрібнення.

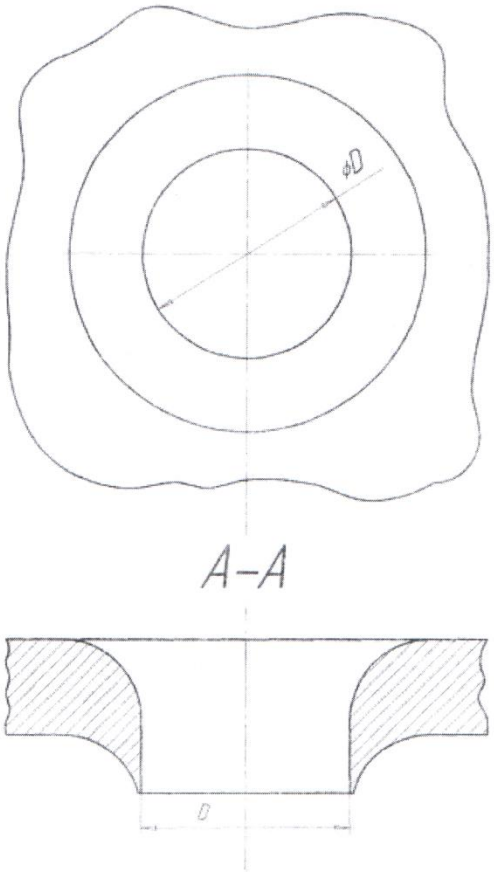
Таким чином зерно, що піддається переробці багаторазово б'ється об рухомі та нерухомі робочі поверхні дробарки, якісно подрібнюється та виводиться із робочої зони.

ФОРМУЛА КОРИСНОЇ МОДЕЛІ

Решітна дробарка для зерна, до якої входить такий сепаруючий елемент як решето, що має вигляд прямокутного полотна з круглими наскрізними отворами, яке **відрізняється** тим, що отвори для підвищення довговічності виконані по вгнутій поверхні, наближеної до тороїдальної форми природного їх зносу.



Фіг. 1



Фіг. 2

Комп'ютерна верстка Г. Паяльніков

Державна служба інтелектуальної власності України, вул. Урицького, 45, м. Київ, МСП, 03680, Україна

ДП "Український інститут промислової власності", вул. Глазунова, 1, м. Київ – 42, 01601

(11) **96341**

(19) **UA**

(51) **МПК**
B02C 13/284 **(2006.01)**

(21) Номер заявки: **u 2014 10222**

(22) Дата подання заявки: **18.09.2014**

(24) Дата, з якої є чинними права на корисну модель: **26.01.2015**

(46) Дата публікації відомостей про видачу патенту та номер бюлетеня: **26.01.2015, Бюл. № 2**

(72) Винахідники:
Бойко Анатолій Іванович, UA,
Морозовська Зоя Анатоліївна, UA

(73) Власники:
Бойко Анатолій Іванович, вул. А. Ахматової, 8, кв. 122, м. Київ, 02068, UA,
Морозовська Зоя Анатоліївна, вул. Ломоносова, 63, м. Київ, 03022, UA

(54) Назва корисної моделі:

РЕШІТНА ДРОБАРКА

(57) Формула корисної моделі:

Решітна дробарка для зерна, до якої входить такий сепаруючий елемент як решето, що має вигляд прямокутного полотна з круглими наскрізними отворами, яке **відрізняється** тим, що отвори для підвищення довговічності виконані по вгнутій поверхні, наближеної до тороїдальної форми природного їх зносу.

Додаток Б

Погоджено

Перший проректор Національного університету біоресурсів і природокористування України, акад. НААН

Ібатуллін І.І.
(ПІБ)

«____» _____ 2016 р.

М.П.

Затверджую

Приватне акціонерне товариство «Харківпродмаш»

Машенко О.В.
(підпис) (ПІБ)

«02» 09 2016 р.

М.П.

А К Т
про впровадження/використання результатів кандидатської (докторської) дисертаційної роботи

Даним актом стверджується, що результати дисертаційної роботи на тему:
«Забезпечення необхідного рівня надійності сепаруючих робочих органів зернодробарок»
назва теми
що представлена на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.05.11 – Машини і засоби механізації сільськогосподарського виробництва виконаної Морозовською Зоєю Анатоліївною
(ПІБ здобувача)

впроваджені у: Приватне акціонерне товариство «Харківпродмаш»

1. Вид впроваджуваних результатів: Рекомендації, щодо проектування та розробки конструкції сепаруючих робочих органів
(методика, рекомендації, пропозиції, модель, експериментальні дані тощо)

Новизна отриманих результатів полягає у:

- розроблено математичну модель процесу зношування робочої поверхні серійних та експериментальних сепаруючих робочих органів зернодробарок;
- прийнято і обґрунтовано гіпотези конструктивного рішення (патент України на корисну модель № 96341) сепаруючого решета зернодробарок;
- встановлено теоретичні та експериментальні залежності впливу оновленого решета на якісні показники процесу сепарації подрібненого зернового матеріалу.

3. Практичне впровадження/використання результатів полягає у:
(місце впровадження/застосування)

- обґрунтуванні та розробці конструкції перспективного сепаруючого решета.

4. Значущість отриманих результатів: очікувана економічна ефективність.

(економічний, соціальний, науково-технічний ефект)

Загальна економічна ефективність від експлуатації удосконаленого сепаруючого решета при річному завантажені зернодробарки – 8320 тони, становить – 2799,92 грн.

5. Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна

(назва, № держреєстрації)

робота виконана на базі науково-дослідної роботи кафедри надійності техніки Національного університету біоресурсів і природокористування України за темою «Підвищення рівня надійності і конкурентоспроможності складної сільськогосподарської техніки», (Державний реєстраційний номер 0110U002869).

Від Національного університету біоресурсів і природокористування України

Начальник науково-дослідної частини

(підпис) Отченашко В.В. (ПІБ)

«27» 09 2016 р.

Директор НДІ техніки, енергетики та інформатизації АПК

(підпис) Войтюк В.Д. (ПІБ)

«27» 09 2016 р.

Аспірант

(підпис) Морозовська З.А. (ПІБ)

«28» 09 2016 р.

ПАТ «ХАРКІВПРОДМАШ»

Генеральний директор

(підпис) Мащенко О.В. (ПІБ)

«02» 09 2016 р.

Бухгалтер

(підпис) Воротняк О.Є. (ПІБ)

«02» 09 2016 р.

Додаток В

Погоджено

Перший проректор Національного університету біоресурсів і природокористування України, акад. НААН

_____ **Ібатуллін І.І.**
(підпис) (ПІБ)

«13» 08 2016 р.

Затверджую

Підсобне госпдарство Берестечківського психоневрологічного інтернату

_____ **Приходько С.І.**
(підпис) (ПІБ)

«14» серпня 2016 р.

АКТ

випробування дослідного зразка експериментального сепаруючого решета

Ми, що нижче підписались, представники Підсобного госпдарства Берестечківського психоневрологічного інтернату з одного боку та представники кафедри надійності техніки Національного університету біоресурсів і природокористування України з іншого боку, склали цей акт про те, що проводились випробування дослідного зразка сепаруючого решета.

Експериментальний зразок сепаруючого решета встановлено у подрібнювальній камері молоткової універсальної дробарки КДУ – 2,0. Аналіз отриманих результатів показує, що за весь період випробувань сепаруючого решета при подрібненні зернового матеріалу термін експлуатації збільшився у 1,8 рази в порівнянні із серійним зразком, що працюють в повністю ідентичних умовах.

Результати проведених випробувань показали надійну роботу експериментального сепаруючого решета, більш ефективне подрібненням та краще просіюванням частинок потрібної фракції. Підтверджена технічна і економічна ефективність використання запропонованої конструкції експериментального сепаруючого решета при подрібненні і сепарації

Представники
кафедри надійності техніки
НУБіП України

Зав. кафедри надійності техніки
_____ д.т.н., проф. Бойко А.І.
(підпис) ПІБ

Аспірант кафедри надійності техніки
_____ Морозовська З.А.
(підпис) ПІБ

Представники

Головний бухгалтер
_____ Стасюк О.В.
(підпис) ПІБ

Завідувач господарством
_____ Форманюк В.С.
(підпис) ПІБ

Додаток Г

Погоджено

Перший проректор
Національного університету
біоресурсів і
природокористування України,
акад. НААН

(підпис) **Ібатуллін І.І.**
(ПІБ)
«__» _____ 2016 р.

Затверджую

Директор
Селянського фермерського
господарства «Стир»
Самолюка А.І.

(підпис) **Самолюк М.А.**
(ПІБ)
«__» _____ 2016 р.

АКТ
випробування дослідного зразка експериментального сепаруючого решета

Ми, що нижче підписались, представники Селянського фермерського господарства «Стир» Самолюка А.І. з одного боку та представники кафедри надійності техніки Національного університету біоресурсів і природокористування України з іншого боку, склали цей акт про те, що проводились випробування двох дослідних зразків сепаруючих решіт з тороїдальною формою отворів близькою до форми природного зношування.

Експериментальні зразки сепаруючих решіт встановлено в подрібнювальну камеру молоткових подрібнювачів КДУ – 2,0. Аналіз отриманих результатів показує, що за весь період випробувань сепаруючих решіт із застосуванням реверсу термін експлуатації до досягнення граничного зносу становить: 1-е решето - 1473 т; 2-е решето - 1468 т.

Отриманий результат проведених випробувань показує ефективність застосування решіт з тороїдальною формою отворів близькою до форми природного зношування, що дозволяє збільшити загальний ресурс решета та підтримує якість вихідного продукту. Підтверджується технічна і економічна ефективність використання запропонованої конструкції сепаруючих решіт при застосуванні у господарсті.

Представники
кафедри надійності техніки
НУБіП України

Зав. кафедри надійності техніки
(підпис) д.т.н., проф. Бойко А.І.
ПІБ

Аспірант кафедри надійності техніки
(підпис) Морозовська З.А.
ПІБ

Представники
Селянського фермерського
господарства «Стир»
Самолюка А.І.

Головний бухгалтер
(підпис) Баландіна Д.А.
ПІБ

Додаток Д

Аналізом зміни форми отворів при їх зношуванні встановлена нерівномірна втрата матеріалу решета. Найбільше переміщення профілю отворів спостерігається у кутовій області з поступовим зменшенням за мірою переміщення до бокових граней. В результаті такої нерівномірності профіль набуває криволінійної форми.

Для математичного опису форми профілю зношування отвору підбираються відповідні криві другого порядку. Виявлено, що найточніше профіль зношеного отвору описується частиною еліпсу (рис.), при чому чим більший наробіток і ступінь зносу отвору, тим більша різниця між малою (b) і великою (a) півосі еліпсу.

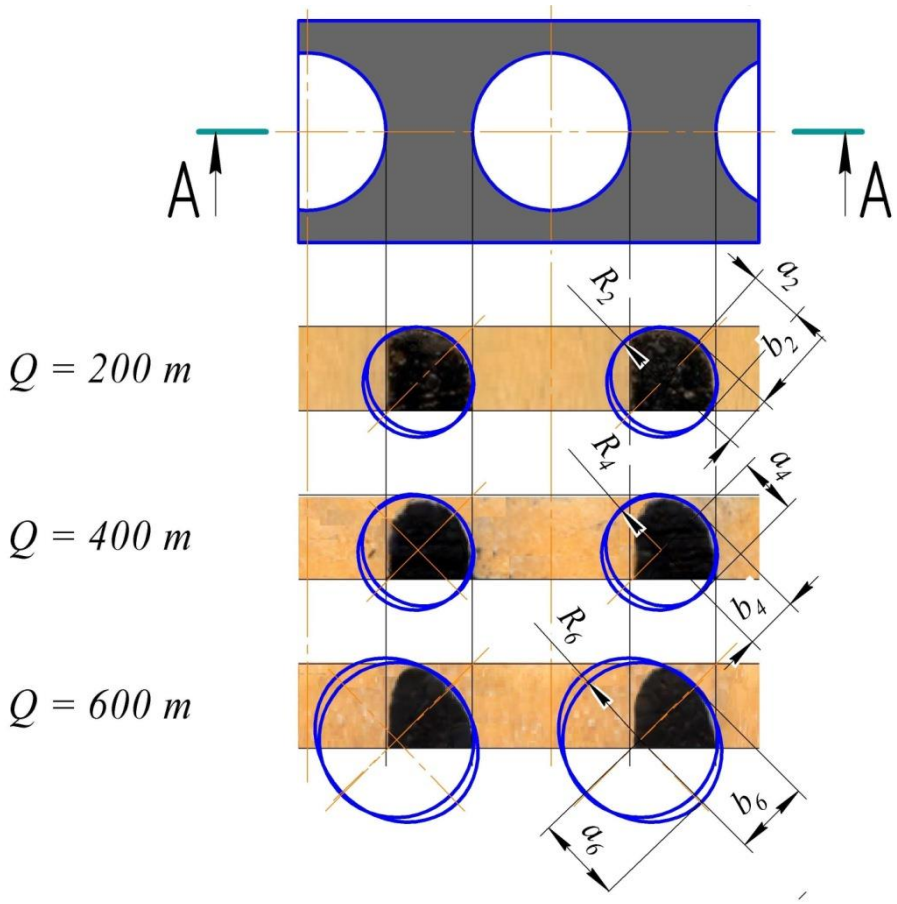


Рис. Типовий вигляд профілів зносу отворів серійного решета із нанесеними кривими, що їх описують

Відомо, що еліпс є одним із січень конуса і описується формулою:

$$\frac{x^2}{a^2}+\frac{y^2}{b^2}=1.$$

Якщо площина еліпса перпендикулярна до осі конуса, то він перетворюється в січення конуса у вигляді кола $x^2+y^2=R^2$.

Правомірно, для спрощення математичного моделювання процес зношування і зміни форми отвору використати опис профілю у вигляді кола, але для цього необхідно оцінити відхилення, що вносить така заміна.

Динаміка зміни форми профілю отвору при різних наробітках представлена на рис., а дані проведених вимірювань зведені в таблицю.

Таблиця

Параметри кривих вписаних в зношені профілі отворів

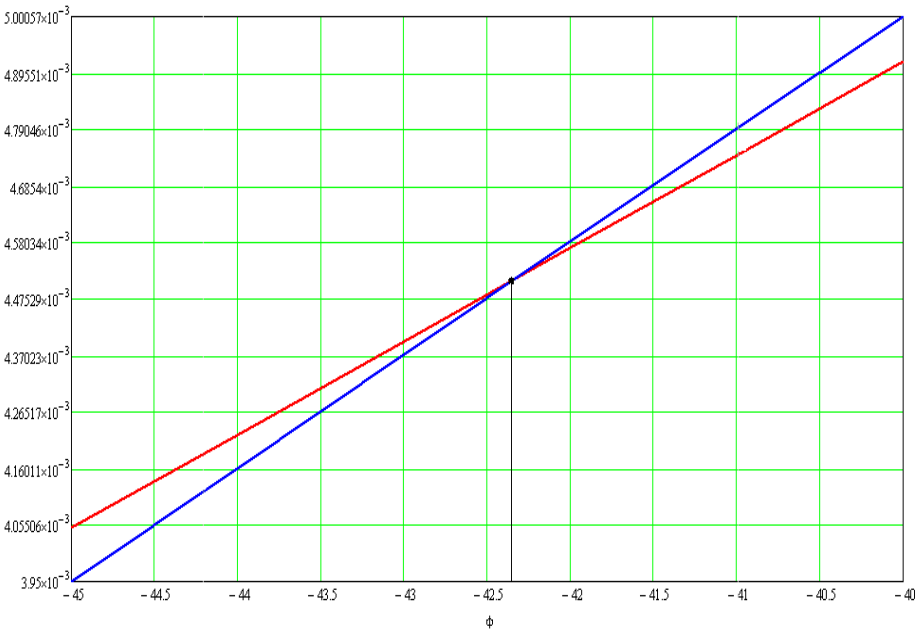
Наробіток решета *Q*, т	Еліпс		Коло	Відхилення		
	мала піввісь *b*, мм	велика піввісь *a*, мм	радіус R, мм	радіуса відносно вісі (*b*), %	радіуса відносно вісі (*a*), %	середнє значення
200	1,19	1, 29	1,27	6,3	2,4	4,3
400	1,24	1,36	1,32	6,1	3	4,5
600	1,58	1,81	1,72	8,1	5,2	6,6

З таблиці видно, що середнє відхилення радіуса кола не перебільшує значення півосей еліпса більш ніж на 6,6%. Відхилення збільшується в міру зростання наробітку решета, але в межах загального його ресурсу встановлення відхилення не вносить суттєвої похибки в опис профілю отвору. Це означає, що в теоретичному моделюванні процес зношування

отвору допустимо опис профілю частиною відповідно кола, що суттєво спрощує математичну модель.

Додаток Е

$$\frac{2\cdot(r1-r2)^2+2\cdot\sqrt{2}\cdot(r1-r2)\cdot r2\cdot\cos(\phi\cdot deg)+r2^2\cdot\cos(\phi\cdot deg)^2}{r1^2\cdot\left[1-\left[\frac{(r2\cdot\sin(\phi\cdot deg))}{r1}\right]^2\right]}$$



$\phi := -45..-40$

$r1 := 0.1$

$r2 := 0.11$

$2\cdot(r1 - r2)^2 + 2\cdot\sqrt{2}\cdot(r1 - r2)\cdot r2\cdot\cos(\phi\cdot deg) + r2^2\cdot\cos(\phi\cdot deg)^2$

$4.05\cdot10^{-3}$
$4.223\cdot10^{-3}$
$4.397\cdot10^{-3}$
$4.57\cdot10^{-3}$
$4.744\cdot10^{-3}$
$4.917\cdot10^{-3}$

$$r1^2\cdot\left[1-\left[\frac{(r2\cdot\sin(\phi\cdot deg))}{r1}\right]^2\right]$$

$3.95\cdot10^{-3}$
$4.161\cdot10^{-3}$
$4.372\cdot10^{-3}$
$4.582\cdot10^{-3}$
$4.792\cdot10^{-3}$
$5.001\cdot10^{-3}$

Додаток Є

Результати вимірювань втрати товщини шару матеріалу отворів серійного решета на стороні *(A)* при наробітках

Наробіток, *Q* (т)	100-200	200-300	300-400	400-500	500-600
Нормалі до профілей зносу	Величини зносів Δh, мм				
	C – D	*D – E*	*E – F*	*F – G*	*G – H*
0	0,225	0,172	0,145	0,128	0,119
I	0,216	0,168	0,143	0,127	0,118
II	0,183	0,156	0,136	0,123	0,115
III	0,128	0,135	0,125	0,116	0,11
IV	–	0,104	0,109	0,105	0,102
V	–	0,066	0,088	0,092	0,093
VI	–	–	0,06	0,074	0,08
VII	–	–	–	0,5	0,063
VIII	–	–	–	–	0,046
IX	–	–	–	–	0,026

Результати вимірювань втрати товщини шару матеріалу отворів серійного решета на стороні *(Б)* при наробітках

Наробіток, *Q* (т)	100-200	200-300	300-400	400-500	500-600
Нормалі до профілей зносу	Величини зносів Δ*h*, мм				
	C' – D'	*D' – E'*	*E' – F'*	*F' – G'*	*G' – H'*
0	0,112	0,085	0,07	0,061	0,056
I	0,108	0,083	0,069	0,06	0,055
II	0,07	0,08	0,067	0,059	0,054
III	0,075	0,072	0,063	0,057	0,052
IV	–	0,061	0,057	0,054	0,049
V	–	0,047	0,05	0,049	0,045
VI	–	0,03	0,041	0,044	0,04
VII	–	–	0,031	0,037	0,033
VIII	–	–	0,017	0,028	0,024
IX	–	–	–	0,016	0,015

Додаток Ж

Результати вимірювань втрати товщини шару матеріалу отворів експериментального решета на стороні *(А)* при наробітках

Профілі зносу	Наробіток, Q (т)	Нормалі до профілей зносу				
		0	*I*	*II*	*III*	*IV*
		Величини зносів, Δh (мм)				
B – C	0-100	0,097	0,098	0,1	0,101	0,103
C – D	100-200	0,096	0,097	0,099	0,1	0,102
D – E	200-300	0,095	0,096	0,098	0,099	0,101
E – F	300-400	0,094	0,095	0,097	0,098	0,1
F – G	400-500	0,093	0,095	0,096	0,097	0,099
G – H	500-600	0,092	0,093	0,094	0,096	0,097
H – I	600-700	0,091	0,092	0,093	0,095	0,096
I – J	700-800	0,09	0,091	0,092	0,094	0,095
J – N	800-900	0,089	0,09	0,091	0,093	0,094
N – P	900-1000	0,088	0,089	0,09	0,092	0,093
P – U	1000-1080	0,082	0,083	0,084	0,086	0,087

Результати вимірювань втрати товщини шару матеріалу отворів експериментального решета на стороні *(Б)* при наробітках

Профілі зносу	Наробіток, *Q* (т)	Нормалі до профілей зносу				
		0	*I*	*II*	*III*	*IV*
		Величини зносів, Δ*h* (мм)				
B' – C'	0-100	0,051	0,053	0,055	0,056	0,058
C' – D'	100-200	0,05	0,052	0,053	0,055	0,057
D' – E'	200-300	0,049	0,051	0,052	0,053	0,055
E' – F'	300-400	0,048	0,049	0,051	0,052	0,054
F' – G'	400-500	0,047	0,048	0,05	0,051	0,053
G' – H'	500-600	0,046	0,047	0,049	0,05	0,051
H' – I'	600-700	0,045	0,046	0048	0,049	0,050
I' – J'	700-800	0,044	0,045	0,046	0,047	0,048
J' – N'	800-900	0,043	0,044	0,045	0,046	0,047
N' – P'	900-1000	0,042	0,043	0,044	0,045	0,046
P' – U'	1000-1080	0,033	0,035	0,036	0,038	0,039

Додаток З

Результати вимірювань втрати товщини шару матеріалу отворів експериментального решета на стороні *(А)* після перевертання (реверсу)

Профілі зносу	Наробіток, *Q* (т)	Нормалі до профілей зносу				
		0	*I*	*II*	*III*	*IV*
		Величини зносів, Δ*h* (мм)				
1-2	750-850	0,045	0,046	0048	0,049	0,050
2-3	850-950	0,044	0,045	0,046	0,047	0,048
3-4	950-1050	0,043	0,044	0,045	0,046	0,047
4-5	1050-1150	0,042	0,043	0,044	0,045	0,046
5-6	1150-1250	0,041	0,042	0,043	0,044	0,045
6-7	1250-1350	0,039	0,040	0,041	0,042	0,043
7-8	1350-1450	0,038	0,039	0,040	0,041	0,041

Результати вимірювань втрати товщини шару матеріалу отворів експериментального решета на стороні *(Б)* після перевертання (реверсу)

Профілі зносу	Наробіток, *Q* (т)	Нормалі до профілей зносу				
		0	*I*	*II*	*III*	*IV*
		Величини зносів, Δ*h* (мм)				
1'-2'	750-850	0,091	0,092	0,093	0,095	0,096
2'-3'	850-950	0,09	0,091	0,092	0,094	0,095
3'-4'	950-1050	0,089	0,09	0,091	0,093	0,094
4'-5'	1050-1150	0,088	0,089	0,09	0,092	0,093
5'-6'	1150-1250	0,087	0,088	0,089	0,089	0,090
6'-7'	1250-1350	0,086	0,087	0,087	0,088	0,089
7'-8'	1350-1450	0,085	0,086	0,087	0,087	0,088