

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ДЕРЖАВНИЙ БІОТЕХНОЛОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

БОГОМОЛОВ ОЛЕКСАНДР ОЛЕКСІЙОВИЧ

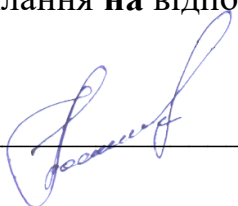
УДК 631.362

ДИСЕРТАЦІЯ
ОБГРУНТУВАННЯ ПАРАМЕТРІВ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ
СЕПАРАЦІЇ НАСІННЯ ПРОСА НА ГРАВІТАЦІЙНИХ УДАРНИХ
СЕПАРАТОРАХ

Галузь знань 13 – Механічна інженерія
133 – Галузеве машинобудування

Подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії з технічних наук

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

 О.О.Богомолів

Науковий керівник – **Михайлов Валерій Михайлович**,
доктор технічних наук, професор,
Заслужений діяч науки і техніки
України

ХАРКІВ-2026

АНОТАЦІЯ

Богомолів О.О. Обґрунтування параметрів технологічного процесу сепарації насіння проса на гравітаційних ударних сепараторах: – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії з технічних наук за спеціальністю 133 Галузеве машинобудування (13 «Механічна інженерія»). Державний біотехнологічний університет Міністерства освіти і науки України. Харків, 2026.

Експериментальні дослідження проводились на кафедрі «Обладнання та інжинірингу переробних і харчових виробництв» Державного біотехнологічного університету на сумішах насіння проса та важковідокремлюваних домішок засміченістю від 9,8 до 20,1 % після очищення вихідних сумішей на пневмо-решітних-триєрних робочих органах.

В дисертації вирішене наукове завдання спрямоване на підвищення ефективності технологічного процесу сепарації насіння проса від важковідокремлюваних домішок – насіння щетинника сизого та курячого проса на гравітаційних ударних сепараторах без витрат енергії на процес сепарації.

В роботі проаналізовано сучасний стан технологічних процесів та обладнання для сепарації насіння проса від насіння важковідокремлюваних бур'янів, щетинника сизого та курячого проса, та встановлено, що способи та обладнання які на даний час застосовуються для очищення насіння проса від важковідокремлюваних бур'янів не забезпечують достатньої якості сепарації. Відділити насіння курячого проса та щетинника сизого повністю не вдається. Повторні пропуски насіння призводять до збільшення травмованості зерна та енергоємності процесів сепарації. У спеціальних очисних машин – пневмостолів, падді-машин, віброфрікційних машин процеси сепарації також є найбільш енергоємними.

Виконано аналіз досліджень фізико-механічних властивостей, насіння

проса та щитинника сизого і курячого проса та встановлено, що найбільші відмінності серед фізико-механічних властивостей насіння проса і бур'янів спостерігаються в їхній пружності, тому сепарацію насіннєвих сумішей проса та бур'янів слід здійснювати на ударних гравітаційних сепараторах, а підвищення якості процесу сепарації насіння проса за пружністю можливе шляхом збільшення кількості ударних випробувань частинок суміші з робочими поверхнями ударних сепараторів і підвищення, за рахунок цього більш спрямованих у підсумковому рахунку траєкторій руху частинок в робочому органі сепаратора у відповідні фракції. Недостатня вивченість закономірностей сепарації насіння проса за пружними властивостями стримує можливості розробки та удосконалення робочих органів ударних сепараторів, на яких можливе підвищення ефективності технологічного процесу очищення насіння проса від важковідокремлюваних бур'янів.

Віброударній сепарації насіннєвих сумішей, у тому числі ударної присвячена значна кількість робіт. Їх аналіз показує, що у більшості робіт недостатньо уваги приділено ударної взаємодії кулеподібних частинок.

Запропонована програма експериментальних досліджень була спрямована на розв'язок завдань дослідження фізико-механічних властивостей насіння проса та важковідокремлюваних бур'янів, які впливають на процеси ударної сепарації насіннєвої суміші проса, обґрунтування ознаки подільності насіннєвої суміші проса від важковідокремлюваних бур'янів та визначення можливості їх відбору у відходи неповноцінного насіння проса, проведення експериментальних досліджень дальності польоту насіння від його пружності та перевірку адекватності результатів теоретичних досліджень руху насіння по робочим органам дослідним даним, визначення конструкторсько-технологічних параметрів та оптимальних режимів роботи розроблених сепараторів, підтвердження ефективності роботи сепараторів при очищенні насіння проса.

Запропоновані та виготовлені інноваційні прилади для визначення статичного та динамічного коефіцієнтів зовнішнього тертя.

Дослідження пружності насіння методом кидання, завдяки застосуванню відеозйомки дозволило на основі аналізу уповільненого кадру точніше визначати коефіцієнт відновлення швидкості при ударі, який істотно впливає на результати сепарації насіннєвої суміші проса та важковідокремлюваних бур'янів. За допомогою запропонованого приладу, шляхом його переналадки, визначали також дальності відскоку зерна від похилої поверхні, що відбиває.

Розглянуті напрями зниження енергоємності процесів сепарації зернових сумішей із застосуванням існуючих та розроблених способів та засобів сепарації. Запропоновано алгоритм мінімізації енерговитрат при сепарації зерна на сучасних зерноочисних машинах та алгоритм мінімізації енерговитрат при сепарації важкороздільних зернових сумішей.

Проаналізовано та доведено, що в науковій літературі приділено недостатньо уваги ударній взаємодії кулеподібних частинок, як твердих тіл з нерухомою похилою відбивною поверхнею та удару пружних тіл з урахуванням коефіцієнта відновлення швидкості під час удару на станах стискання та розтискання тіл з урахуванням сухого позиційного тертя. Встановлено, що це розглядались також процеси руху твердого тіла після удару об похилу відбивну поверхню у напрямку поперечному до нахилу поверхні. У результаті проведених досліджень удару кулястого тіла з нахиленою відбивною поверхнею встановлено, що обертання частинки припиняється протягом першої фази удару і відбивання відбувається звичайним чином, тобто в межах реальних значень частот обертання частинки при падінні на нахилену площину, коефіцієнтів тертя і кутів нахилу площини, що відбиває, обертання частинки не надає істотного впливу на відбивання (відскок) частинки від площини, і їм можна знехтувати.

Встановлено, що врахування позиційного тертя суттєво впливає на розраховані параметри удару. Воно зменшує максимум зближення центрів мас тіл і збільшує максимум сили удару та тривалість динамічної взаємодії. Названі параметри також суттєво залежать від форми граничних поверхонь

тіл в області їх контакту. Внесені зміни в постановку задачі дисипативного удару, внаслідок чого коефіцієнт відновлення швидкості віднесено до вхідних даних, які задають для проведення розрахунку. При цьому має враховуватись залежність коефіцієнта відновлення від початкової швидкості удару.

Розроблена дисипативна модель удару є досить загальною. Вона дає можливість проводити розрахунки колінеарного удару твердих тіл, обмежених різними поверхнями. Урахування позиційного тертя не змінює показник нелінійності системи. Він залишається таким, як і при ударі ідеально пружних тіл, але в дисипативній моделі кількісно відрізняються процес динамічного стискання і розтискання тіл, завдяки різним жорсткостям системи на цих етапах. Оскільки в запропонованій моделі коефіцієнт відновлення швидкості задається як вхідний параметр, то апріорі враховується його залежність від швидкості удару, на яку орієнтовано розрахунок. Тому викладена теорія позбавлена недоліку відомих дисипативних моделей удару, в яких не задають, а обчислюють коефіцієнт відновлення швидкості, відповідно до визначених характеристик жорсткості системи на етапах динамічного стискання і розтискання тіл. В таких моделях коефіцієнт відновлення швидкості не залежить від швидкості удару, що протирічить відомим експериментальним даним. Отже, внаслідок зміни постановки задачі, вдалося усунути цей недолік теорії, тобто поліпшити її адекватність.

Показано, що робота гравітаційних сепараторів базується на відмінностях компонентів суміші за шорсткістю та пружністю, а можливість використання моменту інерції частинок, як ознаки подільності на таких сепараторах в дослідженнях, які проводились у даному напрямку, як правило, залишалась поза увагою. Проведені теоретичні дослідження руху частинок кулястої форми по гравітаційній поверхні показали доцільність проведення розрахунків і побудови просторових траєкторій руху частинок у середовищі Mathcad. Також з'ясовано, що дальність транспортування

фракцій сипкої суміші, які відрізняються між собою пружністю або шорсткістю практично однакова, тому сепарація сумішей за цим критерієм недоцільна. Поряд з цим, частинки суміші з більшою пружністю мають в процесі руху більшу дальність стрибків, що вже успішно використовується, але різниця у висоті підскоку частинок різної пружності, як критерій розподілу, практично не реалізується. На нашу думку цей критерій може бути корисним для багатоярусних гравітаційних сепараторів, де пружні частинки можуть взаємодіяти з верхніми робочими органами, в результаті чого їх траєкторія буде вигідно відрізнятися порівняно з траєкторіями інших частинок. Момент інерції частинок відносно їх центра мас, як критерій розподілу, до цього часу вивчений не достатньо. Як відомо, він залежить від розподілу мас всередині усієї насінини і саме цей розподіл виділяє зріле виповнене зерно серед інших насінин. Виконані теоретичні дослідження показали, що траєкторії руху частинок з різними моментами інерції мають достатньо різну дальність транспортування. Це свідчить про доцільність розподілу сипких сумішей на гравітаційних сепараторах за цим критерієм, а також сепараторах інших конструкціях які доцільно розробити для сепарації сипких сумішей за цим критерієм.

Розроблено лабораторний гравітаційний багатоярусний ударний сепаратор з регульованими параметрами подачі зерна, повздовжнього та поперечного кутів нахилу опозитно встановлених робочих поверхонь та лабораторний гравітаційний ударний сепаратор з поперечною подачею з регульованими параметрами подачі зерна, кута нахилу робочої поверхні та кута нахилу лотка живильного пристрою отримані варіаційні криві розмірних характеристик, коефіцієнтів тертя, коефіцієнтів відновлення швидкості під час удару граничних кутів підйому та траєкторій руху по віброфрикційним поверхням насіння проса та важковідокремлюваних бур'янів курячого проса та щетинника сизого свідчить про неможливість поділу насіннєвих сумішей за розмірами та коефіцієнтами тертя. Відокремлення насіння проса від важковідокремлюваних домішок можливе за граничними кутами їх підйому або траєкторіями руху по похилій фрікційній вібруючий поверхні та

коефіцієнтами відновлення швидкості під час удару об відбивну поверхню. Найкращих результатів сепарації слід очікувати на робочих поверхнях облицьованих фанерою технічною.

Результати проведених досліджень дальності відскоку насіння проса та засмічувачів після удару об похилу відбивну поверхню показали можливість очищення насіння проса від насіння щетинника сизого та курячого проса за рахунок розбіжностей у пружних властивостях компонентів суміші та ударних взаємодій зерна з похилою поверхнею.

Комплексним аналізом результатів теоретичних та експериментальних досліджень, проведених багатофакторних експериментів визначені взаємозв'язки основних конструктивних параметрів сепаратора для двох варіантів його компоновки у вигляді рівнянь регресії і знайдені раціональні значення режимів його роботи за результатами аналізу двовимірних перерізів поверхонь відгуку для багатоярусного ударного сепаратора за умови максимального виходу очищеної фракції 70%, в тому числі 43% 1 класу, ці параметри такі: поздовжній кут нахилу робочого органу – $3,6^{\circ}$ - $3,8^{\circ}$, подача зерна – 47,5-51,7 кг/год, поперечний кут нахилу – $35,6^{\circ}$. Для компоновки робочого органу з поперечною подачею при максимальному виході очищеної фракції 73%, в тому числі 43% 1 класу, параметри такі: поперечний кут нахилу – $34,2^{\circ}$, кут нахилу живильника – $32,6^{\circ}$, подача – 9,6 кг/год. Виробничими випробування розробленого гравітаційного багатоярусного сепаратора з ударного сепаратора в умовах СФГ «Калина» Чугуївського району Харківської області встановлено, що сепаратор простий в обслуговуванні, надійний і безпечний в експлуатації і забезпечує за один прохід підготовку кондиційного насіння зерна проса. Передбачуваний річний економічний ефект від випробування гравітаційного багатоярусного ударного сепаратора складає 20960,3 грн на один сепаратор.

Ключові слова: сепарація, просо, фізико-механічні властивості, ударний сепаратор, коефіцієнт тертя, коефіцієнт відновлення швидкості при ударі, раціональні параметри.

ABSTRACT

Bogomolov O. Justification of the parameters of the technological process of millet seeds on gravitational impact separators – In the rights of the manuscript.

Dissertation for the degree of Doctor of Philosophy in Technical Sciences in the specialty 133 Industrial Mechanical Engineering (13 "Mechanical Engineering"). State Biotechnological University of the Ministry of Education and Science of Ukraine. Kharkiv, 2026.

Experimental studies were conducted at the Department of "Equipment and Engineering of Processing and Food Production" of the State Biotechnological University on mixtures of millet seeds and difficult-to-separate impurities with a contamination of 9.8 to 20.1% after cleaning the initial mixtures on pneumatic-sieve-trier working bodies.

The dissertation solves a scientific problem aimed at increasing the efficiency of the technological process of separating millet seeds from difficult-to-separate impurities – bluegrass and chickweed seeds on gravitational impact separators without energy consumption for the separation process.

The paper analyzes the current state of technological processes and equipment for separating millet seeds from seeds of difficult-to-separate weeds, bluegrass and chickweed, and establishes that the methods and equipment currently used to clean millet seeds from difficult-to-separate weeds do not provide sufficient quality of separation. It is not possible to completely separate chickweed and chickweed seeds. Repeated seed skipping leads to increased grain injury and energy consumption of separation processes. In special cleaning machines – pneumatic tables, paddy machines, vibrofriction machines, separation processes are also the most energy-intensive.

An analysis of studies of the physical and mechanical properties of millet seeds and blue and chicken millet was performed and it was found that the greatest differences among the physical and mechanical properties of millet and weed seeds are observed in their elasticity, therefore, the separation of seed mixtures of millet

and weeds should be carried out on impact gravity separators, and improving the quality of the process of separating millet seeds by elasticity is possible by increasing the number of impact tests of the mixture particles with the working surfaces of impact separators and increasing, due to this, more directed in the final account, the trajectories of particle movement in the working body of the separator into the corresponding fractions. Insufficient study of the patterns of separation of millet seeds by elastic properties hinders the possibilities of developing and improving the working bodies of impact separators, which can increase the efficiency of the technological process of cleaning millet seeds from difficult-to-separate weeds.

A significant number of works are devoted to the vibration-impact separation of seed mixtures, including impact. Their analysis shows that in most works insufficient attention is paid to the impact interaction of spherical particles.

The proposed experimental research program was aimed at solving the problems of studying the physical and mechanical properties of millet seeds and difficult-to-separate weeds, which affect the processes of impact separation of the millet seed mixture, substantiating the sign of the separability of the millet seed mixture from difficult-to-separate weeds and determining the possibility of their selection as waste of inferior millet seeds, conducting experimental studies of the flight range of seeds from their elasticity and checking the adequacy of the results of theoretical studies of the movement of seeds along the working bodies with experimental data, determining the design and technological parameters and optimal operating modes of the developed separators, confirming the efficiency of the separators in cleaning millet seeds.

Innovative devices for determining static and dynamic coefficients of external friction have been proposed and manufactured.

The study of seed elasticity by the throwing method, thanks to the use of video recording, allowed, based on the analysis of a slow-motion frame, to more accurately determine the coefficient of recovery of speed upon impact, which significantly affects the results of the separation of a seed mixture of millet and

difficult-to-separate weeds. With the help of the proposed device, by reconfiguring it, the distances of grain rebound from an inclined reflecting surface were also determined.

The directions of reducing the energy intensity of grain mixture separation processes using existing and developed separation methods and means have been considered. An algorithm for minimizing energy consumption during grain separation on modern grain cleaning machines and an algorithm for minimizing energy consumption during the separation of difficult-to-separate grain mixtures have been proposed.

It is analyzed and proven that insufficient attention is paid in the scientific literature to the impact interaction of spherical particles as solids with a fixed inclined reflecting surface and the impact of elastic bodies taking into account the coefficient of velocity recovery during impact in the states of compression and expansion of bodies taking into account dry positional friction. It is established that the processes of motion of a solid body after impact on an inclined reflecting surface in the direction transverse to the inclination of the surface were also considered. As a result of the conducted studies of the impact of a spherical body with an inclined reflecting surface, it was established that the rotation of the particle stops during the first phase of the impact and the reflection occurs in the usual way, that is, within the limits of the real values of the particle rotation frequencies when falling on an inclined plane, friction coefficients and angles of inclination of the reflecting plane, the rotation of the particle does not have a significant effect on the reflection (rebound) of the particle from the plane, and they can be neglected.

It has been established that taking into account positional friction significantly affects the calculated impact parameters. It reduces the maximum convergence of the centers of mass of the bodies and increases the maximum impact force and the duration of the dynamic interaction.

The named parameters also significantly depend on the shape of the boundary surfaces of the bodies in the area of their contact. Changes have been

made to the formulation of the problem of dissipative impact, as a result of which the velocity recovery coefficient is referred to the input data that are set for the calculation. In this case, the dependence of the recovery coefficient on the initial impact velocity must be taken into account. The developed dissipative impact model is quite general. It makes it possible to calculate the collinear impact of solid bodies bounded by different surfaces. Taking into account the positional friction does not change the nonlinearity index of the system. It remains the same as in the impact of perfectly elastic bodies, but in the dissipative model, the process of dynamic compression and expansion of bodies differs quantitatively, due to the different stiffnesses of the system at these stages. Since the velocity recovery coefficient is set as an input parameter in the proposed model, its dependence on the impact velocity, on which the calculation is oriented, is taken into account a priori. Therefore, the presented theory is devoid of the disadvantage of the known dissipative impact models, in which the velocity recovery coefficient is not set, but calculated, in accordance with the determined characteristics of the system stiffness at the stages of dynamic compression and decompression of bodies. In such models, the velocity recovery coefficient does not depend on the impact velocity, which contradicts the known experimental data. Therefore, as a result of changing the problem statement, it was possible to eliminate this disadvantage of the theory, that is, to improve its adequacy. It is shown that the operation of gravitational separators is based on the differences in the roughness and elasticity of the mixture components, and the possibility of using the moment of inertia of particles as a sign of divisibility on such separators in studies conducted in this direction, as a rule, remained out of consideration. The conducted theoretical studies of the motion of spherical particles on a gravitational surface showed the feasibility of carrying out calculations and constructing spatial trajectories of particle motion in the Mathcad environment. It was also found that the transportation distance of the fractions of the loose mixture, which differ in elasticity or roughness, is practically the same, therefore, the separation of mixtures according to this criterion is impractical. Along with this, the particles of

the mixture with greater elasticity have a greater jumping distance during movement, which is already successfully used, but the difference in the height of the jump of particles of different elasticity, as a distribution criterion, is practically not implemented. In our opinion, this criterion can be useful for multi-tiered gravity separators, where elastic particles can interact with the upper working bodies, as a result of which their trajectory will differ favorably compared to the trajectories of other particles. The moment of inertia of particles relative to their center of mass, as a distribution criterion, has not been studied sufficiently to date. As is known, it depends on the distribution of masses inside the whole seed and it is this distribution that distinguishes mature filled grain among other seeds. Theoretical studies have shown that the trajectories of particles with different moments of inertia have quite different transportation distances. This indicates the feasibility of distributing bulk mixtures on gravity separators according to this criterion, as well as separators of other designs that are expedient to develop for the separation of bulk mixtures according to this criterion.

A laboratory gravity multi-tier impact separator with adjustable grain feed parameters, longitudinal and transverse angles of inclination of oppositely installed working surfaces and a laboratory gravity impact separator with transverse feed with adjustable grain feed parameters, angle of inclination of the working surface and angle of inclination of the feeder tray have been developed. The obtained variation curves of dimensional characteristics, friction coefficients, velocity recovery coefficients during impact, limiting angles of elevation and trajectories of movement along vibrofriction surfaces of millet seeds and difficult-to-separate weeds of chickweed and bluegrass indicate the impossibility of separating seed mixtures by size and friction coefficients. Separation of millet seeds from difficult-to-separate impurities is possible based on their maximum lift angles or trajectories of movement along an inclined frictional vibrating surface and the coefficients of velocity recovery during impact on a reflecting surface.

The best separation results should be expected on work surfaces lined with technical plywood.

The results of the conducted studies of the rebound range of millet seeds and litter after impact on an inclined reflective surface showed the possibility of cleaning millet seeds from bluegrass and chickweed seeds due to differences in the elastic properties of the mixture components and impact interactions of the grain with the inclined surface.

A comprehensive analysis of the results of theoretical and experimental studies, multifactorial experiments, determined the relationships of the main design parameters of the separator for two variants of its layout in the form of regression equations and found rational values of its operating modes based on the results of the analysis of two-dimensional sections of the response surfaces for a multi-tier impact separator under the condition of a maximum yield of the cleaned fraction of 70%, including 43% of the 1st class, these parameters are as follows: longitudinal angle of inclination of the working body – 3.6° - 3.8° , grain feed – 47.5-51.7 kg/h, transverse angle of inclination – 35.6° . For the layout of the working body with transverse feed at a maximum yield of the cleaned fraction of 73%, including 43% of the 1st class, the parameters are as follows: transverse angle of inclination – 34.2° , angle of inclination of the feeder – 32.6° , feed – 9.6 kg/h. Production tests of the developed gravity multi-tiered separator from the impact separator in the conditions of the Kalyna SFG in the Chuguyiv district of the Kharkiv region have established that the separator is easy to maintain, reliable and safe to operate and provides the preparation of conditioned millet seeds in one pass. The estimated annual economic effect from the test of the gravity multi-tiered impact separator is 20,960.3 UAH per separator.

Key words: separation, millet, physical and mechanical properties, impact separator, friction coefficient, velocity recovery coefficient upon impact, rational parameters.

ПЕРЕЛІК ОПУБЛІКОВАНИХ РОБІТ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Богомолов О.В., Михайлов В.М., Завгородній О.І., Ірклієнко В.І., Богомолов О.О., Іващенко С.Г. До питання енергоємності процесів сепарації зернових сумішей. Вісник Том 13, Запоріжжя: ТДАТУ, 2022. –С. 1-8.

2. Богомолов О. В., Михайлов В. М., Завгородній О. І., Гурський П. В., Богомолов О. О., Бойко Є. В. Шляхи зниження енергоємності процесів сепарації зернових сумішей // Прогресивні техніка та технології харч. вир-в ресторан. госп-ва і торгівлі : збірник наук. пр. - Харків : ДБТУ, 2024. - Вип. 1 (35). - С. 165-179.

3. Богомолов О.В., Завгородній О.І., Богомолов О.О., Бойко Є.В., Науменко Є.М., Шуваєв М.С. До питання удосконалення компоновки схеми приводу віброфрикційного сепаратора насінєвих сумішей // Прогресивні техніка та технології харчових виробництв, ресторанного господарства та торгівлі. Харків : ДБТУ, 2024. Вип. 2 (36).

4. Богомолов О.О. Сепарація насіння проса за дальністю відскоку після удару об похилу відбивну поверхню. Прогресивні техніка та технології харчових виробництв, ресторанного господарства та торгівлі. 2024. Вип.1.(35).С.156-164.

5. Богомолов О.В., Михайлов В.М., Богомолов О.О., Бойко Є.В., Панов В.О., Бочарніков І.О. До питання сепарації зернових сумішей без витрат енергії на процес сепарації // Прогресивні техніка та технології харчових виробництв, ресторанного господарства та торгівлі. Харків : ДБТУ, 2025. Вип. 4 (38). С.156-166.

6. Богомолов О.В., Михайлов В.М., Завгородній О.І., Ляшенко Б.В., Богомолов О.О., Бойко Є.В. Удосконалення компоновки схем приводів вібраційних сепараторів // Прогресивні техніка та технології харчових виробництв, ресторанного господарства та торгівлі. Харків : ДБТУ, 2025. Вип. 4 (38). С.148-156.

7. Богомолов О.В., Михайлов В.М., Богомолов О.О., Бойко Е.В. До

питання обґрунтування способу визначення коефіцієнтів тертя кочення та приладу для його здійснення // Прогресивні техніка та технології харчових виробництв, ресторанного господарства та торгівлі. Харків : ДБТУ, 2025. Вип. 3 (37). С.174-180.

8. Богомолів О.В., Михайлов В.М., Богомолів О.О., Панов В.О. Дослідження параметрів процесу сепарації насіння проса на гравітаційному фрикційному сепараторі // Прогресивні техніка та технології харчових виробництв, ресторанного господарства та торгівлі. Харків : ДБТУ, 2025. Вип. 3 (37). С.188-199.

9. Oleksiy Bohomolov, Oleksiy Zavhorodnii, Vadym Bredykhin, Petro Hurskyi, Oleksandr Bohomolov, Taras Shchur, Patrycja Walichnowska, Kruszelnicka, Andrzej Tomporowski. Modeling the impact of elastic bodies taking into account dry positional friction and the coefficient of velocity restoration//Advances in Science and Technology Research Journal. ISSN 2299-8624 Volume 19, Issue 7, 2025.

10. Богомолів В.П., Зінченко М.О., Богомолів О.О., Удар кулястого тіла об похилу площину. //Сучасні напрямки технології та механізації процесів переробних і харчових виробництв. Вісник ХНТУСГ, -Харків: ХНТУСГ, 2009.-Вип.88.- С. 279-285.

11. Завгородній О.І., Богомолів О.В., Богомолів О.О., Бойко Є.В. Моделювання ударного руху частинки по похилій площині з подачею у поперечному напрямку // Науковий журнал «Технічний сервіс агропромислового, лісового та транспортного комплексів» -Харків: ДБТУ, 2026.-Вип.28.

12. Гравітаційний сепаратор сипких сумішей за пружністю та коефіцієнтами тертя: патент на корисну модель №162405, Україна: МПК В07В13/00, Богомолів О.В., Богомолів О.О., Ляшенко Б.В. та ін.-№ у 2025 02908; заявл. 17.06.20254; опубл. 25.03.2026, Бюл. №12-4с.

13. Прилад для визначення коефіцієнтів тертя сипких матеріалів: патент на корисну модель № 158522, Україна: МПК G01 N19/02, Богомолів

О.В., Михайлов В.М., Богомолов О.О. та ін. - № 2024 01911; заявл. 11.04.2024; опубл. 19.02.2025, Бюл. №8 – 4с.

14. Богомолов О.В., Михайлов В.М., Богомолов О.О. Польотов І.В., Бурдяк Я.М. До питання обґрунтування параметрів процесу сепарації насіння проса на гравітаційному ударно-фрикційному сепараторі. /Матеріали всеукраїнської науково-практичної конференції здобувачів вищої освіти і молодих вчених “Сучасна інженерія агропромислових і харчових виробництв”. –Х: ДБТУ, 2022. –С. 7-10.

15. Богомолов О.В., Михайлов В.М., Богомолов О.О., Бочарніков І.О. До питання сепарації насіння проса на гравітаційному фрикційному сепараторі. Матеріали Міжнародної науково-практичної конференції «Молодь і технічний прогрес в АПВ». –Х: ДБТУ, 2023. –С. 519-521.

16. Богомолов О.В., Михайлов В.М. Богомолов О.О., Науменко Є.М., Похитайло Ю.О., Тимошенко Н.А. До питання сепарації зернових сумішей за пружними властивостями на ударній декі. /Матеріали всеукраїнської науково-практичної конференції здобувачів вищої освіти і молодих вчених “Сучасна інженерія агропромислових і харчових виробництв”. –Х:ДБТУ, 2023.–С.13-15.

17. Богомолов О. В., Михайлов В. М., Завгородній О. І., Гурський П. В., Іващенко С. Г., Богомолов О.О. Сепарація насіння проса за дальністю польоту після удару об похилу відбивну поверхню. /Матеріали III Міжнародної науково-практичної конференції молодих учених. “Технічне забезпечення інноваційних технологій в агропромисловому комплексі”. – Запоріжжя: ТДАТУ, 2023. –С. 121-124.

18. Богомолов О.В., Михайлов В.М., Завгородній О.І., Богомолов О.О., Бойко Є.В. Сепарація купи насінневої купи проса за сукупністю фізико-механічних властивостей компонентів. Матеріали міжнародної науково-практичної конференції «Технічний прогрес в АПВ». –Х: ДБТУ, 2024. –С. 353-355.

19. Михайлов В.М., Богомолов О.О., Сівірін Д.С. Сепарація насіння

проса за сукупністю фізико- механічних властивостей. Матеріали XX міжнародного форуму молоді "Молодь і індустрія 4.0 в XXI столітті" –Х: ДБТУ, 2024. –С. 60.

20. Богомол О.В., Михайлов В.М., Богомол О.О., Панов В.О., Бочарніков І.О., Бібленко О.С., Карпенко А.С., Козлюк Б.М. Дослідження параметрів сепарації насіння проса на гравітаційному ударному сепараторі. Матеріали міжнародної науково-практичної конференції «Молодь і технічний прогрес в АПВ». –Х: ДБТУ, 2024. –С. 422 -423.

21. Богомол О.В., Михайлов В.М., Богомол О.О., Бойко Є.В. Обґрунтування способу визначення коефіцієнтів тертя качення та приладу для його здійснення Матеріали міжнародної науково-практичної конференції «Технічний прогрес в АПК». –Х: ДБТУ, 2025. –С. 419-420.

22. Богомол О.В., Михайлов В.М., Богомол О.О., Панов В.О. Обґрунтування параметрів процесу сепарації насіння проса на гравітаційному фрикційному сепараторі. Матеріали міжнародної науково-практичної конференції «Технічний прогрес в АПК». –Х: ДБТУ, 2025. –С. 441-443.

23. Богомол О.В., Завгородній О.І., Богомол О.О., Бойко Є.В., Богомол Д.С., Макарова Н.О. До питання конфігурації робочого органу сепаратора «Молодь і технічний прогрес в АПВ».–Х:ДБТУ,2025.–С. 443 -445.

24. Богомол О.В., Михайлов В.М., Богомол О.О., Бочарніков І.О. Сепарація та сортування насіння проса на гравітаційному багатоярусному ударному сепараторі. Матеріали міжнародної науково-практичної конференції «Технічний прогрес в АПК». –Х: ДБТУ, 2026.

Матеріали, які додатково відображають наукові матеріали дисертації

25. Богомол О.В., Панов В.О., Богомол О.О., Григорова М.Є., Звягінцева В.О. Про вибір кута нахилу фрикційної поверхні вібраційного сепаратора. Матеріали XX міжнародного форуму молоді "Молодь і індустрія 4.0 в XXI столітті" –Х: ДБТУ, 2024. –С. 81.

26. Богомол О.В., Завгородній О.І., Богомол О.О., Бойко Є.В.,

Науменко Є.М., Шуваєв М.С., Масалов І.О., Нієлов Р.С. Удосконалення компоновки схеми приводу віброфрикційного сепаратора насінневих сумішей. Матеріали міжнародної науково-практичної конференції «Молодь і технічний прогрес в АПВ». –Х: ДБТУ, 2024. –С. 418 -420.

27. Богомолів О.В., Іващенко С.Г., Богомолів О.О., Скляр Р.С., Швець О.С., Вороніна А.Ю. До питання удосконалення способу віброфрикційної сепарації насінневих сумішей. Матеріали міжнародної науково-практичної конференції «Молодь і технічний прогрес в АПВ». –Х:ДБТУ, 2024. –С.420-421.

28. Богомолів О.В., Михайлов В.М., Богомолів О.О., Бочарніков І.О., Скляр Р.С., Світлична В.Г., Визначення кута кидання зерна зернопультом на максимальну дальність «Молодь і технічний прогрес в АПВ». –Х: ДБТУ, 2025. –С. 448-450.

29. Здрібнювач зернових сумішей: патент на корисну модель № 162201, Україна: МПК В07В 7/01, Богомолів О.В., Михайлов В.М., Загорулько А.М., Богомолів О.О. та ін. - № у 2025 02921; заявл. 17.06.2025; опубл. 04.03.2026, Бюл.№9 – 4с.

30. Здрібнювач рослинної сировини: патент на корисну модель №158110, Україна: МПК В07В 7/01, Богомолів О.В., Ірклієнко В.І., Михайлов В.М., Богомолів О.О. та ін. № у 2024 01912; заявл. 11.04.2024; опубл. 01.01.2025, Бюл.№1 – 4с.

ЗМІСТ

Вступ	22
Розділ 1. Аналіз сучасного стану технологічних процесів та обладнання для сепарації насіння проса	29
1.1. Вимоги до якості насіння проса в нових технологіях вирощування	29
1.1.1. Просо як круп'яна культура та його значення	29
1.1.2. Агротехніка вирощування проса	31
1.1.3. Післязбиральна обробка вороху і вимоги до підготовки насіння проса	34
1.2. Огляд конструкцій сепараторів для очищення насіння проса	38
1.3. Аналіз досліджень фізико-механічних властивостей насіння проса та бур'янистих рослин	48
1.4. Аналіз теоретичних досліджень процесів руху зерна по робочим поверхням віброфрикційних та ударних сепараторів	51
Висновки за розділом 1	54
Розділ 2. Теоретичні передумови сепарації насінневих сумішей за пружними та фрикційними властивостями	57
2.1. Ударна взаємодія кулеподібного тіла з нахиленою поверхнею	57
2.2. Позиційне тертя в моделі удару пружних тіл з рахуванням коефіцієнта відновлення швидкості	62
2.2.1. Математичне моделювання динамічного стискання тіл	65
2.2.2. Математичне моделювання динамічного розтискання тіл	67
2.2.3. Результати обчислень параметрів удару та їх порівняльний аналіз	68
2.3. Моделювання ударного руху частинки по похилій площині з подачею у поперечному напрямку	75
Висновки за розділом 2	83
Розділ 3. Програма і методика експериментальних досліджень	85

	20
3.1. Програма експериментальних досліджень	85
3.2. Методика визначення фізико-механічних властивостей насіння проса та важковідокремлюваних бур'янів	86
3.2.1. Дослідження коефіцієнтів тертя	89
3.2.2. Дослідження коефіцієнтів відновлення швидкості під час удару	96
3.2.3. Дослідження ваги 1000 насінин	98
3.2.4. Дослідження розмірних характеристик насіння	99
3.2.5. Дослідження граничних кутів підйому насіння по похилій фрикційній вібраційній площині	100
3.2.6. Дослідження траєкторій руху частинок по вібраційній фрикційній поверхні	102
3.3. Лабораторні установки та пристрої	104
3.3.1. Лабораторний гравітаційний багатоярусний ударний сепаратор	104
3.3.2. Лабораторний гравітаційний ударний сепаратор з поперечною подачею	106
Висновки за розділом 3	108
Розділ 4. Результати експериментальних досліджень сепарації насіння проса	110
4.1. Дослідження розмірних характеристик	111
4.2. Дослідження граничних кутів підйому насіння по похилій вібраційній фрикційній поверхні	113
4.3. Дослідження траєкторій руху часток по вібраційній фрикційній поверхні	115
4.4. Дослідження коефіцієнтів тертя	116
4.5. Дослідження пружних властивостей насіння проса та важковідокремлюваних бур'янів	117
4.6. Визначення можливості сепарації насіння проса за дальністю відскоку після удару об похилу відбивну поверхню	119

4.7. Визначення раціональних параметрів процесу сепарації насіння проса на гравітаційному багатоярусному сепараторі	124
4.8. Визначення раціональних параметрів процесу сепарації насіння проса на гравітаційному ударному сепараторі з поперечною подачею	129
4.9. Рекомендації щодо зниження енергоємності процесів сепарації зернових сумішей	135
Висновки за розділом 4	143
Розділ 5. Техніко-економічна ефективність удосконаленого гравітаційного сепаратора для сепарації насіння проса	146
5.1. Виробничі випробування гравітаційного сепаратора для очищення насіння проса	146
5.2. Техніко-економічна ефективність впровадження гравітаційного сепаратора для очищення насіння проса	151
Висновки за розділом 5	157
Загальні висновки та пропозиції	159
Список використаних джерел	162
Додатки	178

ВСТУП

Основою одержання високих урожаїв сільськогосподарських культур є забезпечення посівів високоякісним посівним матеріалом. Для цього необхідно з усієї маси насіння, отриманого при збиранні, відібрати насіннєвий матеріал, що має найбільшу біологічну цінність. Сюди має увійти насіння, кожне з яких після висіву в ґрунт могло б повною мірою реалізувати біологічний потенціал, який закладений у ньому генетично. Вирішити це завдання можна шляхом удосконалення технології підготовки посівного матеріалу зерноочисними машинами, які могли б здійснювати відбір найціннішого насіння за їх біологічними властивостями та відокремлювати важковиділюване насіння бур'янів.

Післязбиральна обробка насіння проса може проводитись у кілька етапів, залежно від засміченості матеріалу та вимог, які пред'являються до кінцевого продукту обробки. Вона може включати попереднє очищення, сушіння, первинне, основне і при необхідності – додаткову обробку. На етапах попередньої, первинної та основної обробки використовуються машини з пневморешітними та трієрними робочими органами. Останній етап проводять у випадку, коли із зернової суміші необхідно видалити домішки, що важко відокремити, або відсортувати чисте зерно на фракції із заданими властивостями. На цьому етапі використовуються спеціальні зернообробні засоби – сепаратори різної конструкції, у яких критерієм розділення є шерехуватість пружність, форма та ін.

Серед зазначених виділяються високою якістю додаткової обробки гравітаційні ударні та фрикційні сепаратори, розроблені вченими Державного біотехнологічного університету. Однак застосування таких сепараторів для очищення насіннєвої суміші проса має свої особливості та, до того ж, майже не вивчене. Тому для ефективного очищення насіння проса від насіння бур'янів, що важко відокремити, необхідно вдосконалити конструкції гравітаційних ударних і ударно-фрикційних сепараторів та обґрунтувати

параметри та режими їх роботи.

Актуальність теми.

Однією з найпоширеніших круп'яних культур, в світі посівні площі якої займають четверте місце серед основних зернових є просо.

В останні роки виробництво проса збільшилось у багатьох країнах Америки, Європи та Азії, особливо в Індії. Проте за останні роки в Україні посівні площі проса зменшилися майже в двічі та культура займає другорядні позиції в сівозміні зернових, поступаючись пшениці, житу, ячменю, кукурудзі та іншим популярним злакам. В передвоєнні роки валовий збір проса був достатньо стабільний, так у 2019 році він становив 234,7 тис. т., в у 2020 році – 244 тис.т. Але в 2021 році він скоротився до 191 тис.т. в основному з-за скорочення майже вдвічі посівних площ. В 2022 році він впав до 101,8 тис.т. теж з-за скорочення посівних площ, пов'язаних в свою чергу ще й з воєнними діями. Але вже 2023 році площі посівів проса відновились до воєнного 2021 року і майже відновився валовий збір – 180,2 тис.т. в 2024 році знов знизились до 159,5 тис.т. Організацією об'єднаних націй 2023 рік було об'явлено Міжнародним роком проса, що підвищило поінформованість в світі про цю культуру.

Посіви проса засмічуються великою кількістю бур'янів, насіння яких при збиранні потрапляє у купу з насінням основної культури. Для сепарації насіння проса застосовуються сепаратори загального призначення. На цих сепараторах відділяється значна кількість насіння бур'янів та домішок, які відрізняються від проса за розмірами, та аеродинамічними властивостями, але на практиці просо також засмічується насіннями важковідокремлюваних бур'янів, які за розмірами та аеродинамічними властивостями близькі до насіння проса, це насіння мишію та курячого проса, тому якісна сепарація насіння проса від мишію та курячого проса має певні труднощі і без великих втрат насіння основної культури у відходи, на сепараторах загального призначення з пневмо-решітно-триєрними робочими органами, на яких зазвичай очищають купу насіння проса неможлива.

В той же час видно, що насіння проса відрізняється від насіння цих бур'янів пружністю, формою та коефіцієнтами тертя, тому сепарація купи насіння проса з цими засмічувачами можлива на сепараторах, в яких сепарація здійснюється за сукупністю фізико-механічних властивостей на ударних гравітаційних поверхнях, що сепарують.

Недостатня вивченість закономірностей сепарації насіння за пружними, фрикційними властивостями та формою стримує можливість удосконалення робочих органів пристроїв, які б дозволили підвищити ефективність виконання процесу.

Таким чином удосконалення способів та обладнання для очищення насіння проса бур'янистих рослин за пружними та фрикційними властивостями з метою підвищення його ефективності є актуальним завданням.

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

Робота проводилась у рамках науково-дослідної роботи кафедри «Обладнання та інжинірингу переробних і харчових виробництв» Державного біотехнологічного університету відповідно до програм науково-дослідних робіт на 2022-2025 роки.

Держбюджетної теми «Розробка інноваційних енергозберігаючих технологій, процесів та обладнання для сепарації, транспортування та здрібнення зерна з отриманням нових видів борошна та крупи» (державний реєстраційний номер №0121 U114567).

Госпдоговірної теми №55-23-24Д «Обґрунтування параметрів процесу сепарації зернових сумішей за сукупністю фізико-механічних властивостей», 2023-2024рр., номер державної реєстрації 0123U105326.

Держбюджетної теми №3-24-25 БО «Розробка апаратурно-технологічних рішень із виробництва багатоцільових функціональних харчових продуктів для людей, що перебувають у екстремальних умовах», номер державної реєстрації 0124 U000402.

Мета дослідження: підвищення ефективності технологічних процесів

сепарації насіння проса від важковідокремлюваних бур'янистих домішок за відмінностями у пружних властивостях шляхом обґрунтування конструктивно-режимних характеристик розроблених сепараторів.

Задачі дослідження:

- Провести аналіз стану питання в науці і виробництві та визначити шляхи підвищення ефективності процесів сепарації насіння проса та удосконалення технічних засобів для реалізації процесів;

- Вивчити фізико-механічні властивості насіння проса та бур'янистих рослин та провести експериментальні дослідження їх фізико-механічних властивостей;

- Удосконалити технологічні схеми багатоярусного ударного сепаратора та ударного сепаратора з поперечною подачею для якісного очищення насіння проса;

- Провести теоретичні дослідження удару кулястого тіла об похилу площину;

- Розробити математичну модель удару пружних тіл з урахуванням тертя та коефіцієнта відновлення швидкості;

- Провести моделювання руху твердого тіла по ударній поверхні з поперечною подачею;

- Обґрунтувати конструктивні та технологічні параметри гравітаційного багатоярусного ударного сепаратора та ударного сепаратора з поперечною подачею.

Об'єкт дослідження: процес сепарації насіння проса і важковідокремлюваних бур'янистих рослин за пружними та фрикційними властивостями та його зв'язок з конструктивно режимними параметрами гравітаційного багатоярусного ударного та ударного сепараторів з поперечною подачею.

Предмет дослідження: встановлення закономірностей взаємодії насіння проса і бур'янів з відбивною неперфорованою поверхнею сепараторів та їх наступного руху.

Методи дослідження: теоретичні дослідження виконані з використанням основних положень теоретичної механіки, методів диференціального та інтегрального числень та математичного моделювання з використанням обчислювальної техніки.

Експериментальні дослідження виконані на виготовлених лабораторних установках. Обробка результатів експериментальних досліджень виконана з застосуванням теорії ймовірностей та математичної статистики з використанням прикладних пакетів програм Microsoft Office Excel, Компас 3D, MathCad.

Для визначення оптимальних конструктивно-кінематичних параметрів сепараторів використовувалася методика планування повнофакторного експерименту.

Наукова новизна отриманих результатів:

Вперше:

- встановлено, що при ударній взаємодії кулеподібної частинки з нахиленою поверхнею обертання частинки припиняється протягом першої фази удару і відбивання відбувається звичайним чином та в межах реальних значень частот обертання частинки при падінні на нахилену площину, коефіцієнтів тертя і кутів нахилу площини, що відбиває, обертання частинки не надає істотного впливу на відбивання (відскок) частинки від площини, і їм можна знехтувати;

- встановлено, що врахування позиційного тертя суттєво впливає на розраховані параметри удару. Воно зменшує максимум зближення центрів мас тіл і збільшує максимум сили удару та тривалість динамічної взаємодії. Названі параметри також суттєво залежать від форми граничних поверхонь тіл в області їх контакту;

- внесені зміни в постановку задачі дисипативного удару, внаслідок чого коефіцієнт відновлення швидкості віднесено до вхідних даних, які задають для проведення розрахунку. При цьому має враховуватись залежність коефіцієнта відновлення від початкової швидкості удару;

- встановлена можливість сепарація частинок на похилій площині в поперечному напрямку з ударом об площину за рахунок використання різниці у висоті траєкторії їхнього руху та в залежності від моменту інерції частинок.

Практичне значення одержаних результатів:

На основі теоретичних та експериментальних досліджень розроблено конструкцію гравітаційного багатоярусного ударного сепаратора, в якому за рахунок здійснення подачі суміші на обидві опозитно встановлені поверхні, що сепарують, першого ярусу продуктивність та ефективність процесу значно збільшується.

Результати наукових досліджень впроваджені у виробництво в компанії «Харчові технології» м. Харків. Обґрунтовані раціональні параметри енергозберігаючих сепараторів для очищення насіння проса від важко відокремлюваних бур'янистих домішок за відмінностями у фізико-механічних властивостях, результати яких впроваджено у фермерському господарстві «Калина» Чугуївського району Харківської області, ТОВ «Компанія «Харчові технології» м.Харків та ТОВ «ЮР АГРО» м.Харків.

Розроблені та виготовлені спеціальні високопродуктивні прилади для визначення коефіцієнтів тертя кочення, коефіцієнтів тертя ковзання та граничного кута підйому насіння по віброфрикційній поверхні, які впроваджені в учбовий процес Державного біотехнологічного університету.

На основі матеріалів досліджень виготовлені дослідні зразки гравітаційного багатоярусного ударного сепаратора та гравітаційного ударного сепаратора з поперечною подачею, які використовуються для очищення насіння проса від важковідокремлюваних бур'янистих домішок в лініях післязбиральної обробки.

Використання результатів дослідження можливо при проектуванні гравітаційних сепараторів для очищення насіння проса та інших сільськогосподарських культур у науково-дослідних і конструкторських організаціях.

Особистий внесок здобувача. Теоретичні та експериментальні результати досліджень, що виносяться на захист, отримані автором самостійно та викладені у роботах [1-30]. У наукових роботах, які опубліковані у співавторстві, здобувачу належать [1,2,4-6]: результати огляду і аналіз досліджень та визначення напрямку підвищення ефективності процесу сепарації насіння проса від насіння важковідокремлюваних бур'янистих рослин;

[7-9] результати математичного моделювання ударної взаємодії кулеподібного пружного тіла з нахиленою поверхнею та удару пружних тіл з урахуванням коефіцієнта відновлення швидкості та моделювання ударного руху частинки по похилій площині з подачею в поперечному напрямку, обґрунтовані граничні умови, приведено аналіз результатів моделювання;

[3,6,12-22] проведені експериментальні дослідження сепарації насінневої суміші проса від важковідокремлюваного насіння бур'янистих рослин та дана конструктивна інтерпретація отриманих результатів та рекомендації щодо подальшого застосування розробок.

Публікації. Основні результати дисертаційної роботи опубліковано в 30 наукових працях, у тому числі 10 статей у спеціалізованих наукових виданнях і 1 стаття у закордонних виданнях, що індексуються міжнародними наукометричними базами [7], 15 тез у збірниках доповідей міжнародних наукових конференцій та 4 патенти України на корисну модель.

Структура й обсяг дисертації. Дисертація складається з вступу, 5 розділів, висновків, списку використаних джерел і додатків на 13 сторінках. Обсяг основного тексту дисертації становить 148 сторінок друкованого тексту, містить 53 рисунки та 24 таблиці. Список використаних джерел нараховує 144 найменувань на 16 сторінках.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ ТА ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ СЕПАРАЦІЇ НАСІННЯ ПРОСА

1.1. Вимоги до якості насіння проса в нових технологіях вирощування

1.1.1. Просо як круп'яна культура та його значення

У структурі рослинництва найважливіше значення мають зернові, технічні, олійні та круп'яні культури. Вони є дуже затребуваними, тому що саме ці культури є основними для виробництва харчових продуктів, можна сказати, що саме вони «кормлять» майже все населення світу. Просо одна з найпоширеніших кроп'яних культур. Воно стало важливою культурою для багатьох країн світу, завдяки своїй здатності рости в різних кліматичних умовах і на бідних ґрунтах. Просо використовується для виробництва продуктів харчування, кормів для тварин та багатьох інших промислових товарів. Основні напрямки його використання в харчовій промисловості – це виробництво пшона та борошна. Пшоно використовується для приготування різноманітних харчових страв, це каші, супи, запіканки та ін. Просяне борошно використовується для випікання хліба, млинців та інших виробів.

У складі пшона вміст білка становить 12%, крохмалю 81%, жиру 3,5%, клітковини 1-2%. За вмістом білка пшоно наближається до манної та кукурудзяної круп, переважає ячмінну, перлову, гречану і особливо рисову крупи, поступаючих лише вівсяні, яка містить 16% білка. У його складі більше жиру, ніж у крупі інших культур, крім вівсяної, багато крохмалю та порівняно мало клітковини. Пшоно багате на зольні елементи, містить такі важливі вітаміни, як В1, В2, РР, а також мікроелементи. Швидко розварюється (через 25-30 хв), дає високий привар (12-13%), а каша добре засвоюється організмом людини.

Його достоїнство, що воно не містить глютену і підходить для людей з целикією.

У кормовиробництві використовується, як просо так і просяна солома, яка є цінним грубим кормом. У 100 кг її міститься 50 корм. од. у комбікормі використовується, у 100 кг якої міститься 42 корм од. Просо використовується також для заготівлі зеленої маси та сіна, які є теж цінним кормом для тварин. Зерно проса та пшоняна каша практично незамінний корм для курчат. Використання проса для дорослих курей підвищує їх несучість і міцність шкарлупи яєць. Для відгодівлі гусей, свиней добрим кормом є просяне борошно у суміші з картоплею або іншими харчовими відходами. Відходи від переробки проса на пшоно, у складі яких є 16% білка та багато жиру, це теж цінний концентрований корм для тварин. Луску, яка залишається при виробництві пшона, також використовують для виготовлення комбікормів.

Просо також використовується для виробництва екологічно чистого виду палива – біоетанолу, виготовлення віників, паперу тобто просо практично безвідходна культура.

Просо як скоростигла культура має певний агротехнічне значення: використовується як страхова культура для пересівання загублої озимини, придатна для післяокисних та післяжнивних посівів, може використовуватись для покривна культура для багаторічних трав.

Просо – одна із давніх зернових культур світового землеробства, яка була відома народам центрального і західного Китаю, гірських районів Монголії за 3-5 тис. років до н. е. В доісторичні часи просо перемістилося з Азії в Європу (Італію) Африку (Єгипет). Близько 2500 р. просо відоме в Закавказзі. У Запорізькій Січі використовували пшоно замість хліба у різних варіантах приготування.

У сучасному світовому землеробстві просо вирощують на площі близько 36 млн га. В даний час у світі виробляється близько 30 млн тон проса.

Із зарубіжних країн просо найбільш поширено на великих площах у Китаї, Індії, Монголії, Пакистані, Нігерії; у Європі – в Болгарії, Югославії, Туреччині, Румунії, Угорщині, Польщі.

В Україні просо найбільш поширене в Степу і Лісостепу.

Середні врожаї проса в Україні коливаються від 20 до 35 ц/га. Застосовуючи прогресивні технології, кращі господарства України вирощують 45-55 ц/га і більше зерна проса.

1.1.2. Агротехніка вирощування проса

Увага до проса, як до культури продовольчого і кормового значення пояснюється порівняльною дешевизною його виробництва і невисокою вимогливістю до ґрунтово-кліматичних умов.

Найбільш придатними для проса є дерново-підзолисті суглинчасті та субпіщані ґрунти, а також добре прогрівані торф'яні ґрунти. Допустимо вирощування на дерново-підзолистих суглинчастих та субпіщаних ґрунтах, що підстеляються пісками. Найбільш високу врожайність просо формує на зв'язних ґрунтах зі слабокислою або нейтральною реакцією середовища (рН 5,5-7,0). Рекомендовані показники ґрунтової родючості: вміст гумусу – не менше 1,6%, доступного фосфора і обмінного калію – не менше 150 мг/кг ґрунту. Здатність проса формувати врожайність на рівні 40-50 ц/га навіть на бідних ґрунтах робить його перспективним в умовах постійного підвищення цін на добрива, засобів захисту та ПММ. Просо менш вибагливе до попередників і не знижує врожайність його при розміщенні після зернових культур таких як: озима пшениця, озиме жито, овес та ін.

Обробка ґрунту під просо складається з луцення стерні і зяблевої і оранки. Зяблева оранка в порівнянні з оранкою весною підвищує врожайність зерна проса на 4,5 ц/га. Рання зяб (серпнева та вереснева) під просо більш ефективна, ніж пізня (жовтнева). Для боротьби з однолітніми

бур'янами весною проводять не менше двох культивацій з боронуванням. Перед посівом ґрунту вирівнюють та ущільнюють комбінованими агрегатами. На торф'яних ґрунтах обробку ґрунту проводять весною при відтаюванні ґрунту на глибину до 15 см, зяб дискують в 2-3 сліди, а потім боронують.

В цілому система обробки ґрунту під просо залежить від ґрунтово-кліматичних умов зони, попередника, вологості ґрунту, ступіню засміченості поля, видового складу бур'янів.

В залежності від ґрунту заздалегідь розраховують дози фосфорних та калійних добрив, які вносять до посіву. Фосфорні рекомендують при наявності спеціальних сівалок вносити в рядки під час посіву проса. Рекомендована доза азотних добрив вноситься в один прийом під культивуацію. Кращі форми мінеральних добрив: карбамід, аміачна селітра, простий амонізований суперфосфат, хлористий калій.

Якщо є ризики зараження проса пильною головною насіння необхідно протруювати, такими препаратами як фундазол, беноміл, вінцит та ін.

Просо на зерно можна висіювати від початку травня до середині червня. Починати посів проса можна при прогріванні ґрунту на глибину посіву до 15°C – це оптимальна температура для отримання дружних сходів. Рекомендовано проводити сівбу проса у Південній зоні республіки у другій декаді травня, а в Центральній та Північній зонах – в кінці третьої декади травня по першу декаду червня включно.

Завдяки можливості посіву і в пізні строки, просо є прекрасною страховою культурою, якою можна пересіяти не лише озимі але й загинувші ярі зернові.

Просо висівають суцільним рядовим способом. Під час сівби зерно на мінеральних ґрунтах при рядовому способі сівби перевагу необхідно віддати нормі висіву 4-5 млн схожого насіння на гектар, що складає 35-40 кг в залежності від маси 1000 насінин. Глибина сівби на важких суглинчастих ґрунтах – 2...3 см, на легкосуглинчастих і торф'яних 3...4 см.

Для отримання дружних сходів проса обов'язковим прийомом на мінеральних ґрунтах є передпосівне прикочування посівів кільчато-шпоровими котками, а на торф'яних ґрунтах – гладко-циліндричними важкими котками. Ущільнення верхнього шару проводиться з урахуванням заміру вологості і кількості випавших атмосферних опадів, тому в засушливих умовах прикочування після посіву є обов'язковим прийомом.

При утворенні ґрунтової корки до появи сходів необхідно проводити боронування посівів, коли пророслі бур'яни знаходяться в стадії білих ниток. Боронують ґрунти легкими або середніми боронами, а також використовують агрегат АБ-9 або його аналоги.

При високій чисельності трипсів в фазу повного виметування метелки обов'язкове обприскування посівів інсектицидами, включеними в каталог рекомендованих препаратів.

Найбільш часто на посівах проса зустрічаються наступні бур'яни: мар біла, пирій повзучий, фіалка польова, просо куряче, горець птичий, зірочка середня, ромашка непахуча, горець в'юнковий, грицики звичайні, щетинник. Для боротьби з ними рекомендується застосування гербіцидів у фазі 3-4 листків проса.

Визначити оптимальний час збирання проса важко, так як метелки основних побігів визрівають раніше, ніж метелки підгонів. В той же час у верхній частині метелки зерно визріває швидше, ніж в нижній. Просо сильно обсіпається, особливо у верхній частині метелки. При цьому слід звернути увагу на наступні особливості проса. Його рослини мають більшу масу, що ускладнює виділення зерна з сирієї соломистого вороху.

Зерно легко обрушується та має властивість великої текучості. Це збільшує втрати при обмолоті і створює складнощі при зберіганні. Щоб запобігти втраті кращої частини врожаю, збирати його варто при дозріванні верхньої частини метелки на високому зрізі, особливо на насіннєводних ділянках, які рекомендовано збирати при вологості зерна не вище 25%.

1.1.3. Післязбиральна обробка вороху і вимоги до підготовки насіння проса

Після обробки зерновий ворох проса включає в себе бур'янисті домішки різного виду: мінеральні – каміння і шматочки землі; зіпсовані зерна проса – биті, запліснявілі, загнивші, над'їдені шкідниками хлібних злаків; стебла; насіння інших рослин вівса, сорго, пшениці та ін.; насіння бур'янів – курячого проса, щетинника, щириці, мари білої та ін.

Тому отримання чистого зерна проса можливо лише після деяких етапів отриманого вороху. На етапі попередньої очистки повітряним потоком видаляються легкі домішки і домішки з великою питомою площею. Тут можуть бути використані повітряно-решетні машини ОПВ-20А, МПО-50. Завдяки повітряному потоку одночасно знижується вологість зерна, але частіше за все вона залишається вище тої, що вимагається, що може призвести до самозігрівання зниженню насіннєвих і продовольчих якостей. Тому на другому етапі обробки зерно сушать. Для сушки зерна проса застосовують різноманітні типи зерносушилок: колонкові, карусельні, барабанні, шахові.

Питома температура нагрівання зерна не повинна перевищувати 40-50° С в залежності від вологи і призначення зерна. Попередньо з невисокою вологістю можна нагрівати до 48-50° С.

Сушку зерна з високою вологістю здійснюють в підлогових бункерних сушилках з при температурі теплоносія 55°С. Температура нагріву зерна при цьому не повинна перевищувати 40° С.

На установках активного вентилявання температуру теплоносія встановлюють в залежності від вологості насіння: 15-17% – 40° С; 18-20% – 32° С; 21-26% – 28° С; більше 28% – 25° С. Тривалість сушки в залежності від вихідної вологості зерна – 2...3 доби.

Для сушки насіннєвого зерна краще використовувати підлогові сушилки. Висота насипу зерна проса – не більше 0,5 м. Витрати повітря –

1000-1500 м³/год на тону зерна.

Вологість просушеного зерна не має перевищувати 14%. Для тривалого зберігання рекомендовано проводити її до 13%.

Після просушування з'являється можливість виділити з суміші сухі стебла, які у вологому стані не піддаються відділенню на попередньому етапі очистки. Для їх видалення (разом з іншими легкими домішками) проводять первинну очистку на повітряно-решетних машинах типу МПО-50, Petkus 527. Одразу після первинної йде основна обробка на машинах ОС-4,5; СМ-4, Petkus Gigant K531 та ін. Тут зерновий ворох розділяється на три фракції: крупні домішки; очищене зерно; мілке, колоте зерно і мілкі домішки (кормове зерно). На цьому етапі важливим є правильний вибір розмірів отворів решіт.

Для очищення проса використовують розподільчі, підсівні та сортувальні решета з круглими і продовгуватими отворами, які підбирають у залежності від розміру насіння. Розподільчі решета рекомендовано встановлювати з круглими отворами діаметром 2,0-2,2 мм. Підсівні решета з решетами з продовгуватими отворами 1,7-2,0 мм і сортувальні також продовгуватими отворами 2,0 мм.

Фракція чистого зерна являє собою суміш насінин хоч і близьких розмірів, але з широко колюючимися показниками посівних якостей (схожості, енергії проростання та ін.). Це пояснюється, перш за все, тим, що на стадії визрівання зерна в різних і навіть одних і тих же метелках (в верхній і нижній частині) різні. Крім того, основна очистка не гарантує стовідсоткового видалення з суміші насіння бур'янистих рослин, тоді як за вимогами ДСТУ 22400-93 [32] на 1 кг високо кондиційного насіннєвого матеріалу проса не допускається жодного зерна бур'яну. Тому гарантовано отримати якісний насіннєвий матеріал після вищезгаданої обробки не є можливим, у зв'язку з чим стає доцільною додаткова обробка. Слід зазначити, що додаткова обробка сприяє зниженню засміченості поля, яка в свою чергу є причиною:

– більшої втрати ґрунтової вологи – бур'яни навіть в умовах недостатньої вологи розвивають потужну вегетативну масу і подавляють культурні рослини, крім того, на створення органічної маси бур'яни використовують значно більшу кількість води ніж культурні рослини;

– значного погіршення умов живлення культурних рослин через збіднення не лише верхніх шарів ґрунту, але і підґрунтових горизонтів більш розвиненим кореневищем бур'янистих рослин;

– посиленого розмноження шкідників та хвороб, так як більшість із них починають розвиватися на бур'янах, а потім розповсюджуються на культурні рослини;

– більше витрат коштів та праці на додаткові операції по очищенню ґрунту від бур'янів, що підвищує собівартість зерна;

– зниження врожайності і погіршення якості кінцевої продукції.

Як показують багаточисельні дослідження [1-22, 47-50, 75-79, 82-88, 95, 121, 130], для отримання зерна високих посівних кондицій при додатковій обробці необхідно вводити нові ознаки розділення, якими в розглянутому випадку можуть бути маловикористовувані, поки що властивості: пружність, шерохуватість, форма, питома вага, електричні властивості та ін. На практиці найбільше розповсюдження отримала додаткова обробка проса на пневматичних насіннеочисних машинах типу CAD. Однак виділити насіння важковіддільних бур'янів по аеродинамічним властивостям не вдається. В той же час значного резерву підвищення посівного матеріалу проса можна досягти на базі сепараторів, що працюють на основі інших ознак розділення. Одними з таких машин є вібраційні безрешетні сепаратори, в яких розділення здійснюється за комплексом фізико-механічних властивостей: пружності, шерохуватості та формі. Доцільність застосування вказаних вібросепараторів для підвищення посівних якостей насіння показана для багатьох культур: еспарцету, тютюну, проса, гречихи, рапсу, пшениці, жита, ячменю, вівса та багатьох інших [7, 8, 11, 16, 20, 22].

Другий вид машин, які доцільно застосовувати для доочистки насіння –

багатоярусні ударні гравітаційні сепаратори, розділення в яких здійснюється переважно за пружними властивостями і формою, які також показали доцільність їх застосування для доочистки зерна багатьох культур, причому без затрат енергії на процес сепарації [7,10, 20, 24, 73] механічних пошкоджень.

Показники якості зерна проса для виробництва круп регламентуються ДСТУ 5026: 2008 [36] для першого, і другого класу представлені в табл. 1.1.

Таблиця 1.1 – Граничні норми для проса, що поставляються для переробки на крупу

Показники	Норма для класу	
	Перший	Другий
Вологість, % не більше	13,5	13,5
Бур'яниста домішка, % не більше	2,0	3,5
Зернова домішка, % не менше	5,0	8,0
Крупність, % не менше	90,0	80,0
Масова доля ядра, % не менше	76,0	74,0
Важковідокремлювана домішка	1,0	2,0

Тобто навіть в ДСТУ, можна сказати, вимушені були допустити вміст важковідокремлювальної домішки для сировини, з якої виробляють продукти харчування. Звісно пшоно буде набагато краще, якщо важковідокремлювальної домішки в ньому не буде зовсім.

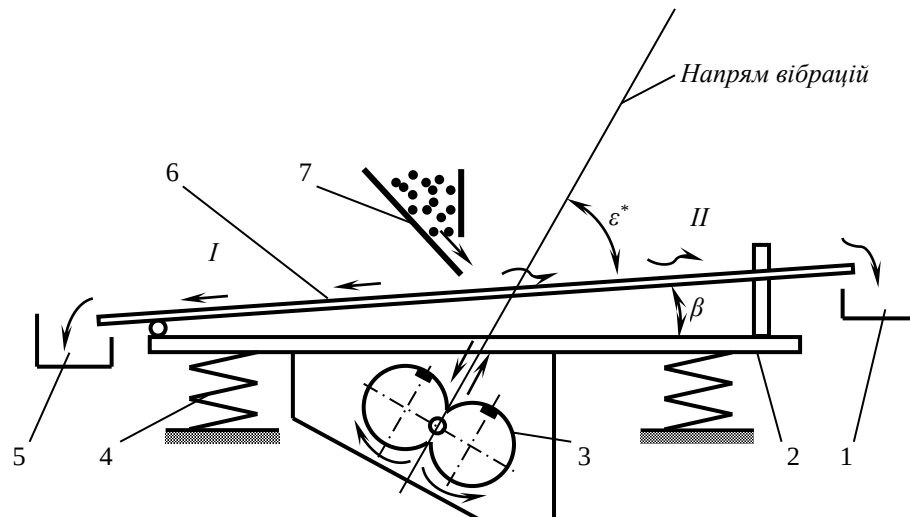
А от насіння проса, яке нормується ДСТУ 22 40-93 «Насіння сільськогосподарських культур сортові та посівні якості» [32] повинно відповідати більш жорстким вимогам, в ньому зовсім не допускається насіння важковідокремлювальних бур'янів, а саме курячого проса та щетинника сизого, які теж регламентуються цим стандартом.

Якісний посівний матеріал проса повинен мати високу енергію проростання, лабораторну схожість не нижче 87-92% (для еліти та 1-2 репродукції) частоту – понад 95-98%, а вологість до 13-14%, а також масу 1000 насінин в межах 5-9 р. Насіння має бути відкаліброваним, здоровим, без механічних пошкоджень.

1.2. Огляд конструкцій сепараторів для очищення насіння проса

Непоганих результатів очищення насіння сільськогосподарських культур від важковідокремлюваних бур'янів можна досягти при сепарації насіння на віброфрикційних сепараторах з неперфорованими робочими поверхнями [20].

Робочим органом віброфрикційних сепараторів є фрикційна поверхня (дека), яка може бути плоскою, ступінчатою або криволінійною, нахиленою в поздовжньому напрямку або в поздовжньо поперечному. Схема віброфрикційного сепаратора з плоским робочим органом нахиленим в поздовжньому напрямку представлена на рис. 1.1.



1, 5 – приймачі продуктів поділу; 2 – вібростол; 3 – вібробудувач;

4 – пружина; 6 – фрикційна поверхня; 7 – пристрій живлення

Рисунок 1.1 – Схема вібраційного сепаратора з плоскою робочою поверхнею

Сепаратор складається з робочої фрикційної поверхні 6, встановленої на вібростолі 2. Кут нахилу до горизонту β цієї поверхні можна регулювати в поздовжньо-вертикальній площині. До вібростолів 2 жорстко кріплять дебалансний двовальний вібробудувач спрямованої дії 3. Вібростіл встановлений на циліндричних пружинах 4. Над робочою поверхнею змонтовано живильник 7. Компоненти суміші переміщуються в приймачі продуктів поділу 1 та 5.

Пружна підвіска у вигляді циліндричних пружин в поєднанні з

віброзбуджувачем спрямованої дії забезпечує коливання робочої поверхні за прямолінійними траєкторіями, спрямованими під гострим кутом ε^* до цієї поверхні.

Основним недоліком цього сепаратора є невисока продуктивність, яка

Обумовлена тим, що суміш для якісного розподілу повинна рухатись робочою поверхнею в один шар.

Встановлення великої кількості робочих поверхонь одна над одною приводить до значних конструктивних ускладнень сепаратора та значного росту габаритів, по висоті, що приводить до зміщення центру тяжіння вібростолу вгору і для того щоби напрям проходив через центр тяжіння його треба зміщувати в горизонтальному напрямку з одночасним поворотом на невизначену величину, що є одним з основних недоліків таких сепараторів. Нами запропонована компоновка привода віброфрикційного сепаратора (рис. 2.) в якій цей недолік усунуто за рахунок переміщення віброзбуджувача по спеціальним салазкам.

За цією схемою ведучий вал віброзбуджувача 1 так само закріплюється в додаткових підшипниках 2, встановлених на вібростіл. Електродвигун 4 закріплюється на корпусі віброзбуджувача так, щоб лінія дії сил, що збуджують віброзбуджувач проходила через центр тяжіння електродвигуна

Для забезпечення ідентичності коливань робочого органу салазки 5 кріплення нижньої точки віброзбуджувача виконують по кривій, яку визначають за залежністю:

$$y = \frac{h_1 x + r_o (L + r_o)}{\sqrt{(L + r_o)^2 - x^2}} - \sqrt{(L + r_o)^2 - x^2}, \quad (1.1)$$

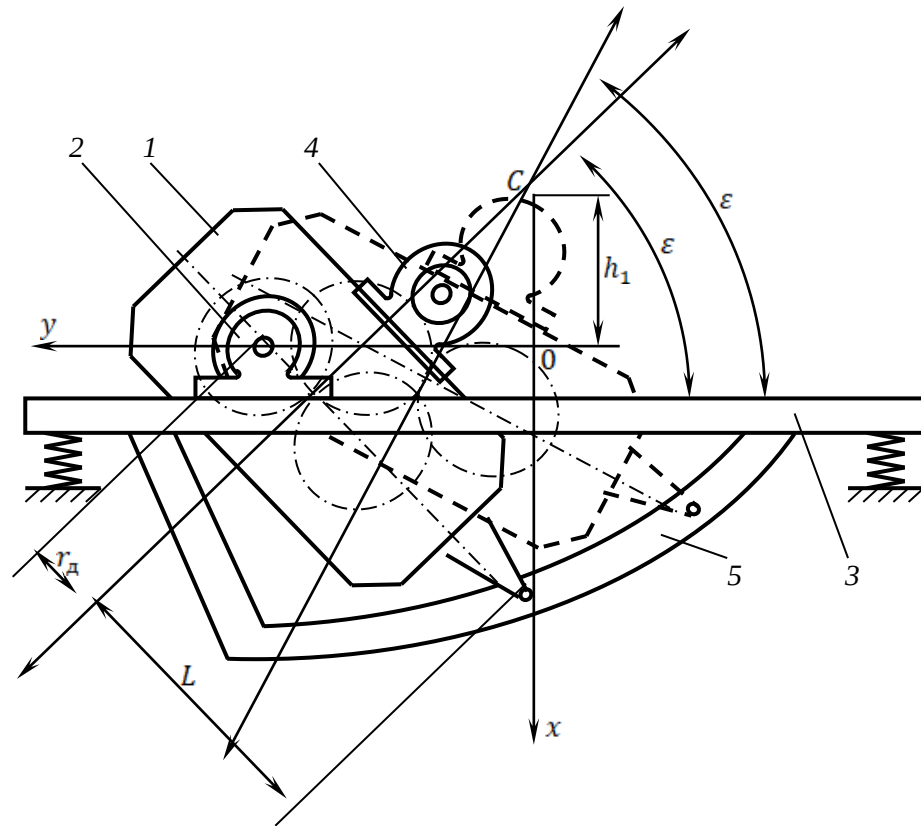
де: x, y – координати кривої;

h_1 – відстань від осі y до центра тяжіння частини, що коливається;

L – відстань між нижньою точкою кріплення віброзбуджувача і напрямом дії збуджуючої сили.

При такій компоновці привода лінія дії збуджуючих сил віброзбуджувача, в будь-якому його положенні проходить через центр

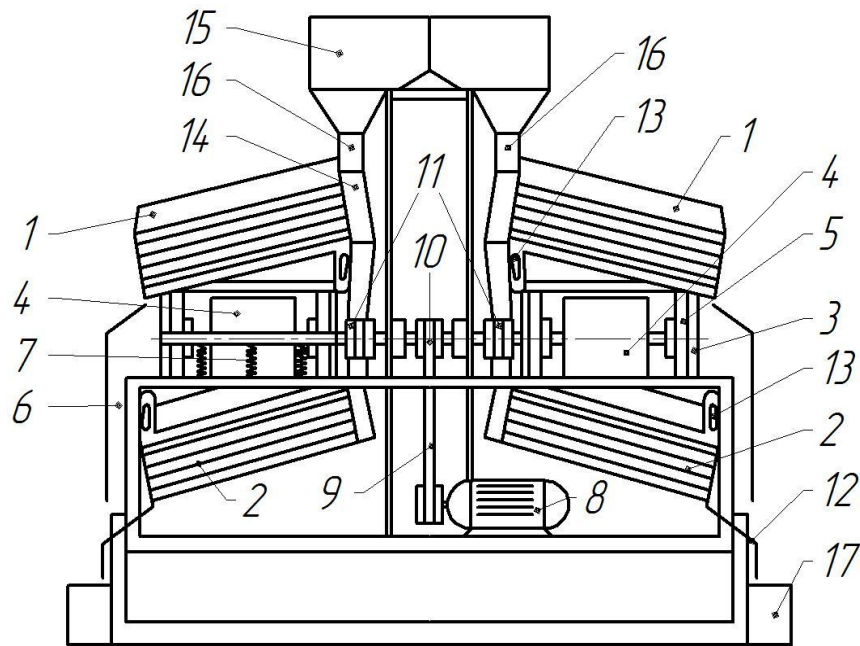
тяжіння C_M частини машини, що коливається, чим забезпечується ідентичність коливань робочого органу при регулюванні кута направленості.



1 – вібробудувач; 2 – корпус підшипника; 3 – вібростіл; 4 – електродвигун;
5 – салазки

Рисунок 1.2 – Схема компоновки привода при розбіжності ведучого валу вібробудувача з центром тяжіння частини що коливається

Регулюють кут направленості коливань наступним чином. Відпускають болтові з'єднання кріпленням вібробудувача і гвинтовим механізмом переміщують вібробудувач уздовж рами 3, при цьому нижня точка кріплення вібробудувача переміщується по опорній криволінійній поверхні 5, в результаті чого вібробудувач повертається навколо ведучого валу, і кут направленості змінюється. Після зміни кута направленості коливань закріплюють болтові з'єднання, що фіксують вібробудувач у встановленому положенні. В сепараторах з подовжньо-поперечним нахилом робочих органів більшість названих недоліків усунуто [20]. Конструктивна схема блочно-модульного віброфрікційного сепаратора представлена на рис. 1.3.



1, 2 – верхні і нижні блоки сепаруючих поверхонь; 3 – вібростіл; 4 – вібратор;
 5 – шарнірна підвіска; 6 – столик; 7 – пружини; 8 – електродвигун; 9 –
 клінопасова передача; 10 – проміжна передача; 11 – пружні муфти; 12,
 13 – механізмом регулюється поздовжнього і поперечного кутів нахилу;
 14 – живильники; 15 – бункер; 16 – патрубки; 17 – приймачі
 Рисунок 1.3 – Конструктивна схема блочно-модульного віброфрикційного
 сепаратора

Сепаратор складається з верхніх 1 та нижніх 2 блоків поверхонь, що сепарують. Верхній і нижній блоки розміщені на вібростолах 3, які приводяться в коливальний рух від віброзбуджувачів 4, закріплених за допомогою шарнірної підвіски 5 до вібростолів.

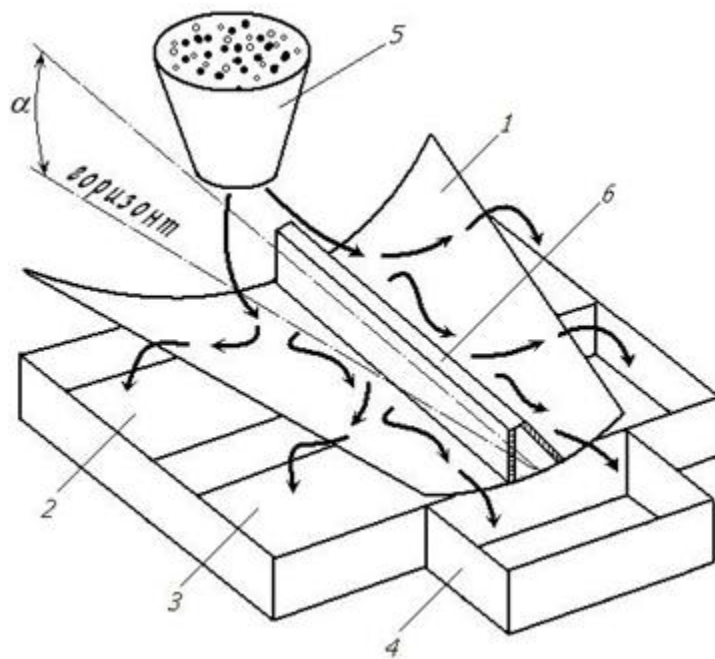
Вібростоли встановлені на столику 6 за допомогою пружин стиснення 7. Віброзбуджувач приводиться в рух від електродвигуна 8 через клинопасову передачу 9, проміжну передачу 10 і пружні муфти 11. Повздовжній кут нахилу поверхонь, що сепарують регулюється механізмом 12, поперечний – механізмом 13. Для подачі матеріалу на робочі поверхні призначені живильники 14, з'єднані з завантажувальним бункером 15 гнучкими патрубками 16. Для збору продуктів поділу є приймачі 17.

Сепаратор працює наступним чином. Зернова суміш подається за допомогою живильників на робочі поверхні верхніх і нижніх блоків.

Під дією спрямованих коливань, створюваних віброзбуджувачем,

компоненти суміші переміщуються за різними траєкторіями в залежності від фізико-механічних властивостей. Плоскі, шорсткі, менш пружні частки переміщуються в верхні приймачі продуктів поділу, а округлі, гладкі, пружні частинки скочуються в нижні приймачі.

Заслуговує на увагу і сепаратор запропонований [37]. в якому малогабаритна увігнута дека, якій задають коливання в поперечному напрямку має подовжню відбивну пластину, яка ділить деку на дві частини і зерно подається одразу двома потоками, за рахунок чого значно збільшується продуктивність сепаратора. Схема такого сепаратора представлена на рис. 1.4.



1 – малогабаритна дека; 2, 3, 4 – приймачі продуктів розподілу; 5 – завантажувальний пристрій; 6 – відбивна пластина

Рисунок 1.4 – Технологічна схема вібросепаратора з відбивною пластиною

Сепаратор включає малогабаритні деки 1, приймачі продуктів поділу 2-4, завантажувальні пристосування 5 з живильними отворами 6. Деки 1, приймачі 2-4 і завантажувальні пристосування 5 жорстко з'єднані між собою і за допомогою напрямних 7 встановлені на рамі 8. Направляючі 7 з'єднані з приводом шатунного механізму, закріпленого на рамі 8.

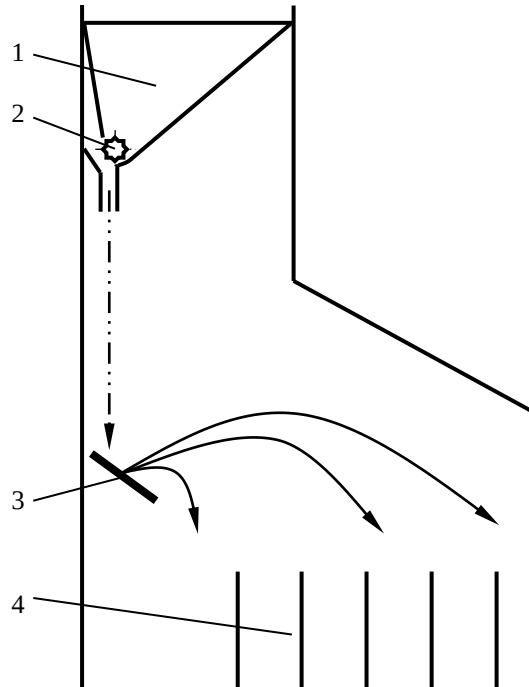
Поділ суміші відбувається в такий спосіб. При включеному приводі

деки 1 здійснюють коливання в поперечному напрямку. Зернова суміш надходить на деки 1 із завантажувального пристосування 5 через отвори 6 живлення. Зерна, що потрапили на деки 1, розгойдуються в поперечному перерізі дек. При цьому більш пружні округлі та гладкі зерна скидаються в бічні приймачі 2-3, а менш округлі та шорсткі – у торцевий приймач 4. Розглянуті способи та обладнання мають високу енергоємність очищення насіння, яка обумовлена в основному невисокою продуктивністю розробленого обладнання.

Аналіз фізико-механічних властивостей насіння проса і важковідокремлюваних бур'янів показує, що найбільші відмінності ознак подільності спостерігаються в їх формі, фрикційних та пружних властивостях. Досвід практичного застосування обладнання, в яких використовуються ці ознаки подільності, також підтверджує перспективність очищення насіннєвого матеріалу проса від важковідокремлюваних бур'янистих домішок за відмінностями фрикційних пружних, властивостей та форми.

Ще за радянських часів були запропоновані сепаратори переважно за фрикційними властивостями, це похилі скатні дошки, гвинтові сепаратори та горки. Перші два види мають гідність в тому, що вони гравітаційні, але з-за невисокої продуктивності і як правило недостатньої якості сепарації, розповсюдження вони не набули. Сепаратори «горка», що мають в якості робочого органу похилий транспортер на якій в його середню частину подається насіннева суміш, а сам транспортер нахилений під таким кутом, що основна фракція, як правило, скочується зі стрічки вниз, домішки при цьому транспортуються в верхні приймачі. Ці сепаратори також не набули розповсюдження з-за низької продуктивності. Також ще за радянських часів, були запропоновані гравітаційні сепаратори для сепарації насіння деяких культур переважно за пружними властивостями. Чому і в першому випадку і зараз використовується слово переважно? Тому що на процес сепарації в обох випадках має вплив і форма насіння. Хоча вона має вплив на процес

сепарації майже в усіх робочих органах. Найбільш детальний аналіз обладнання для сепарації за пружними властивостями наведений в роботі [20]. На рис.1.5 представлено один з гравітаційних сепараторів розглянутий в цій роботі.



1 – живільник; 2 – вигрібний валик; 3 – похила поверхня; 4 – приймачі продуктів розподілу

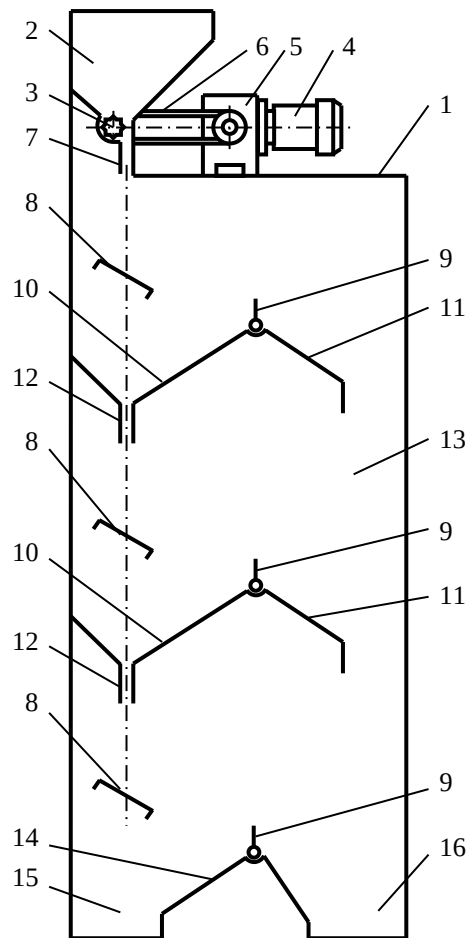
Рисунок 1.5 – Схема сепаратора для сепарації зерна за пружними властивостями

Сепаратор складається з живільника 1 з вигрібним валом 2, відбивну похилу поверхню 3, встановлену під кутом, як правило $22,5^{\circ}$ та приймачі продуктів розподілу 4. Розглянуті також конструкції удосконалені конструкції подібних сепараторів шляхом установки приймачів продуктів розподілу такими, що знижуються, а також із зустрічним повітряним потоком та інші.

Основним недоліком сепараторів подібних конструкцій є невисока якість сепарації. Пояснюється це тим, що розподіл насіння по фракціям здійснюється за рахунок одного удару по відбивній поверхні. А як вже було сказано раніше на процес сепарації впливає також і форма насіння в даному випадку дальність відскоку залежить від того, якою стороною насіння

вдариться об відбивну поверхню, це може бути кут, плоска поверхня чи дуга.

В цій же роботі приведена схема (рис.1.6) триступінчатого відбивного сепаратора запропонованого за радянських часів Слукіним О.Л.



- 1 – корпус; 2 – бункер; 3 – живильник; 4 – електродвигун; 5 – редуктор;
 6 – пасова передача; 7 – щілинний отвір; 8 – відбивні поверхні;
 9 – регульовані дільники; 10, 11, 14 – скатні поверхні; 12 – живильні щілини;
 13, 15, 16 – вивантажувальні вікна

Рисунок 1.6 – Схема триступінчатого відбивного сепаратора:

Сепаратор складається з корпусу 1 рамного типу, бункера 2, установленного на корпусі, активного живильника 3 з робочим органом – рифленим валиком, електродвигуна 4, редуктора, 5 і пасової передачі 6. Щілинний отвір 7 живильника встановлено над відбивною поверхнею 8 першого щабля сепарації.

Каскад, робочих органів, розміщених усередині корпусу, включає три щаблі сепарації. Кожна із щаблів включає похилу відбивну поверхню 8, регульований дільник 9, виконаний у вигляді пластини, закріпленої нижньою

частиною на осі; і дві скатні поверхні 10 і 11, причому скатна поверхня 10, розташована між відбивною поверхнею та дільником, і утворює живильну щілину 12 для нижче розташованого щабля, а поверхня 11 закінчується вивантажувальним вікном 13. Скатна поверхня 14 нижнього щабля, що примикає до дільника з боку відбивної поверхні також закінчується вивантажувальним вікном 15. Вивантажувальне вікно 16 для очищеної фракції розміщено під вікном 13 верхніх щаблів.

Процес очищення насіння відбувається в такій послідовності: вихідний матеріал засипається в бункер 2, відтіля він за допомогою рифленого валика живильника 3 подається в робочу зону сепаратора. Живильник формує вузький плоский потік часток, що падають під дією сили тяжіння на похилу відбивну поверхню 8 верхнього щабля, після удару об відбивну поверхню, насіння змінюють швидкість і напрямок польоту. Повноцінні насіння, що мають високу пружність, здобувають більш високу швидкість і перелітають через пластину дільника 9. Дільник відрегульований таким чином, щоб непружні насіння бур'янистих рослин не могли перелітати його верхню крайку. При цьому частина насіння такі не перелітає через крайку дільника.

Насіння, що перелетіли через дільник, попадають на скатну поверхню 11, по якій надходять у вивантажувальне вікно 13, а потім до вікна 16 виводу очищеної фракції. Насіннєвий матеріал, що не перелетів через крайку дільника по скатній поверхні 10 надходить до щілинного отвору 12 і через нього падає на відбивну поверхню нижче розташованого щабля.

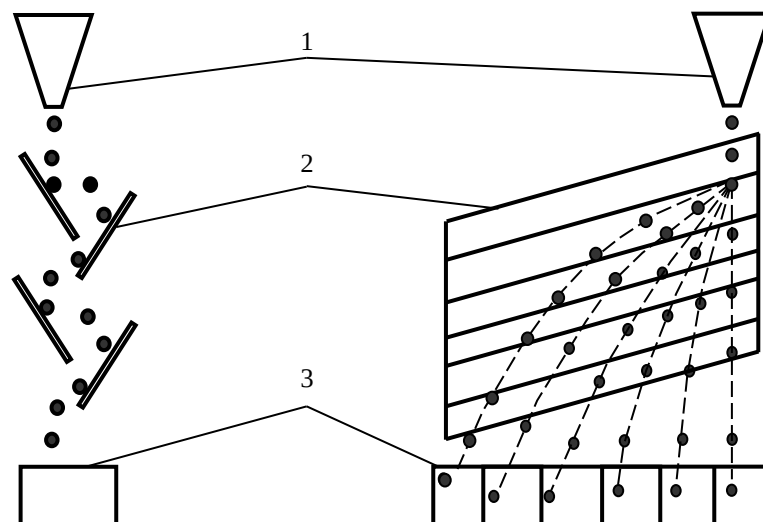
На другому й третьому щаблі процес поділу повторюється. Очищені насіння надходять у вивантажувальне вікно 16, а непружна фракція – у вивантажувальне вікно 15.

Якість очищеного матеріалу й відсоток виходу очищеної фракції регулюється поворотом дільника 9.

Якість роботи ударних сепараторів можна підвищити шляхом використання багаторазового удару насіння об відбивні поверхні, що сепарують, що й зроблено в роботах [7, 11, 14, 16]. Однак ці запропоновані

сепаратори потребують привода. Багаторазові зіткнення насіння із відбивними поверхнями дозволяють як би осереднити їхні пружні властивості і тим самим точніше розділити суміш за пружними властивостями, тому запропонований гравітаційний багатоярусний ударний сепаратор в роботі [69] був принциповим проривом в сепарації насіння за пружними властивостями без витрат енергії на процес сепарації.

Принципова схема багатоярусного ударного сепаратора представлена на рис. 1.7.



1 – живильник; 2 – неперфоровані декі; 3 – приймачі продуктів сепарації
Рисунок 1.7 – Принципова схема гравітаційного багатоярусного ударного сепаратора

Багатоярусний ударний сепаратор складається з одного або декількох модулів залежно від продуктивності. Модуль складається з живильного бункера 1, похилих з поздовжньо-поперечним нахилом неперфорованих дек 2, кожна з яких розташована нижче попередньої від бункера 1 і приймачів продуктів сепарації 3.

У цьому сепараторі зернова суміш із живильника 1 надходить на каскад ударних дек. Деки мають поперечний і поздовжній нахили і розташовані так, що зернова суміш, випробувавши удар об першу деку, співударяється з поруч або в залежності від траєкторії та дальності відскоку нижче розташованою. Чим вище пружність зерна, тим більшу кількість ударів воно випробовує в проміжку

між поруч розташованими деками, і в результаті переміститься на більшу відстань уздовж поздовжньої осі від місця подачі. Зійшовши з верхніх дек, зерно під дією сили ваги знову набирає необхідну швидкість і вдаряється об деку, розташовану нижче, але вже зі зсувом від місця подачі на відстань, пропорційну, в остаточному підсумку, пружності зерна. Далі процес повторюється і у всіх інших, нижчерозташованих деках. У нижній частині пристрою розташовані приймачі продуктів сепарації, і найбільш пружні зерна, в остаточному підсумку, потрапляють у самий далекий від живильника приймач. Відповідно дроблені, щуплі й найменш пружні будуть потрапляти в ближні від живильника приймачі. Таким чином найбільш перспективним напрямом з точки зору зменшення енерговитрат на процес сепарації є гравітаційний багатоярусний ударний сепаратор в якому на процес сепарації енергія зовсім не витрачається, тому удосконалення його конструкції та обґрунтування конструктивних та режимних параметрів сепарації на ньому насіння проса є безперечно актуальним завданням.

1.3. Аналіз досліджень фізико-механічних властивостей насіння проса та бур'янистих рослин

Дослідженням фізико-механічних властивостей сільськогосподарських культур, у тому числі, проса приділялось багато уваги вченими ще за радянських часів, як України та і інших країн. Достатньо повно розмірні характеристики та аеродинамічні властивості представлені Гладковим Н.Г., причому їм вивчені і розмірні характеристики насіння супутніх бур'янів.

Для проса та важковідокремлюваних бур'янів щетинника сизого вони представлені в табл.1.2.

З табл.1.2. видно, що очистити насіння проса від насіння курячого проса, та щетинника сизого за представленими показниками неможливо.

В роботах Заїки П.М. та Мазнева Г.Є. наведені варіаційні ряди

коефіцієнтів тертя проса та важковідокремлюваних бур'янів щетинника сизого та курячого проса на поверхнях облицьованих бельтингом та брезентом, які приведені в табл. 1.3.

Таблиця 1.2 – Характеристика насіння проса та супутніх бур'янів

Назва культури	Розміри насіння, мм			Вага 1000,г	Питома вага	Критична швидкість	Коеф. тертя	
	довжина	ширина	товщина				дерево	сталь
Просо	1,8-3,2	1,5-2,0	1,5-1,7	3-11	1,1-1,2	9,83-11,88	0,4	0,34
Куряче просо	2,4-3,0	1,2-2,6	0,7-2,0	0,3-2,0	1,15-1,25			
Щетинник сизий	2,6-2,9	1,3-2,5	1,0-1,5	1,2-3,7	1,15-1,25			

Таблиця 1.3 – Варіаційні ряди коефіцієнтів тертя насіння проса та бур'янів

Найменування		Класовий проміжок							
		0,25-0,38	0,38-0,50	0,50-0,63	0,63-0,75	0,75-0,88	0,88-1,00	1,00-1,13	1,13-1,25
Просо	Бл		1,3	16,7	71,3	10,0	0,7		
	Бр		2,0	20,6	69,5	7,6	0,3		
Щетинник сизий	Бл	1,3	4,6	8,3	21,0	41,6	20,3	2,6	0,3
	Бр		4,0	3,0	27,7	47,1	16,6	1,3	0,3
Куряче просо	Бл			7,3	66,0	18,0	6,4	2,0	
	Бр		0,3	2,6	64,0	22,0	10,7	0,7	

Як видно з табл.1.3 варіаційні ряди коефіцієнтів тертя насіння проса, щетинника сизого та курячого проса значно перекриваються, що свідчить про неможливість якісної сепарації насіння проса за коефіцієнтами тертя.

В цій же роботі приведені варіаційні ряди граничних кутів підйому насіння проса, щетинника сизого та курячого проса по вібраційним неперфорованим поверхням теж облицьованих бельтингом та брезентом, у безвідривному та відривному режимах роботи сепаратора, які наведені в табл.1.4.

З таблиці видно, що за граничними кутами підйому насіння по вібраційним фрикційним поверхням можлива сепарація купи насіння проса від щетинника сизого та курячого проса з втратами основної культури у відходи у відривному режимі руху насіння по поверхні, що вібрує, при цьому кращі результати слід очікувати на поверхні облицьованій бельтингом.

Таблиця 1.4 – Варіаційні ряди граничних кутів підйому насіння проса та бур'янів

Найменування	Режим роботи установки	Фрикційний матеріал	Класовий проміжок										
			0-2	2-4	4-6	6-8	8-10	10-12	12-14	14-16	16-18	18-20	20-22
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Просо	Б	Бл Бр		2,3 2,0	17,7 20,6	60,0 57,6	17,6 18,2	2,4 1,6					
	О	Бл Бр		1,7 3,6	18,7 38,3	47,0 40,8	24,7 14,0	5,0 3,0	2,0 0,3	0,6	0,3		
Щетинник сизий	Б	Бл Бр	1,3	4,6 4,0	8,3 3,0	10,2 11,4	30,7 50,0	33,4 25,3	8,6 4,7	2,6 1,3	0,3 0,3		
	О	Бл Бр					12,0 23,3	33,0 30,7	28,7 26,7	17,0 9,3	5,6 5,0	3,0 2,6	0,7
Куряче просо	Б	Бл Бр		0,3	8,3 2,6	36,2 39,4	44,3 40,3	7,0 12,7	3,4 4,0	3,2 1,0			
	О	Бл Бр					3,0 3,2	3,0 8,0	20,3 28,0	33,0 40,0	33,7 17,	6,7 3,0	0,3

В цій же роботі наведені результати сепарації насіння проса від щетинника сизого на вібраційному сепараторі робочим органом якого служить неперфорована поверхня нахилена в подовжньому та поперечному напрямках. Показано, що вихід фракції насіння першого класу складає 83,9% при коефіцієнті вилучення насіння проса в цільову фракцію 84,5%.

Результатів сепарації насіння проса від курячого проса в роботі не приведено.

Пружні властивості проса вивчались Висоцьким В.К., ним же розроблені рекомендації по сортуванню проса за пружністю на традиційних установках з однократним ударом.

Граничні кути підйому по вібраційній фрикційній поверхні насіння проса та супутніх бур'янів визначені Бакум В.В. свідчать про можливість сепарації насіння проса від насіння курячого проса та щетинника сизого на вібраційних сепараторах з незначними втратами основної культури у

відходи.

В роботі також представлені варіаційні криві коефіцієнтів відновлення швидкості під час удару насіння проса, щетинника сизого та курячого проса об відбивну поверхню облицьовану брезентом, за якими можна судити про можливість сепарації насіння проса за пружними властивостями. Однак, матеріал ударної поверхні обраний не зовсім технологічним.

В цій роботі показано також можливість сортування насіння проса за сукупністю фізико-механічних властивостей пружних, фрикційних та форми на віброфрикційному сепараторі з відбором у відходи неповноцінного насіння і підвищення за рахунок цього посівних якостей насіння проса.

Пізніше вже в незалежній Україні Бакумом М.В. [5] розглянуті можливості очищення насіння проса від насіння супутніх бур'янів за відмінностями в розмірних характеристиках.

Ним рекомендовані розміри отворів решіт, на яких можна виділити більшість насіння бур'янистих рослин, таких як сорго, мишій, берізка, мар біла майже повністю. Показано також, що насіння курячого проса та щетинника сизого можна виділити від купи насіння проса, але з втратами основної культури.

1.4. Аналіз теоретичних досліджень процесів руху зерна по робочим поверхням віброфрикційних та ударних сепараторів

Процеси сепарації зернових сумішей, в яких розподіл здійснюється переважно за пружними, фрикційними властивостями та формою здійснюється на вібраційних або ударних поверхнях, що сепарують. Сепарація на цих поверхнях здійснюється за рахунок відмінностей траєкторій та швидкостей руху по вібраційним або ударним неперфорованим поверхням. Кращий ефект досягається якщо ці величини відмінні не тільки за величиною, а і напрямом.

Питаннями моделювання технологічних процесів віброударної сепарації частинок займалось і займається багато українських вчених П.М. Василенко, П.М. Заїка, О.І. Завгородній, Ю.А. Манчинський, О.В. Богомолів, Б.І. Котов, О.В. Козаченко, В.В. Бредихін, В.П. Ольшанський, Є.Б. Алієв, П.С. Степаненко, В.В. Бакум, М.В. Бакум, О.В. Лук'яненко, А.Д. Михайлов, М.М. Крекот, І.Д. Харук, І.В. Чалий та ін., а також іноземні вчені AI-Lwayzy S. H. [83], Eberhard, P., Alkhaldi, H [99], Gunaji Ashok Sawant, V. Murali Mohan, Sandip Ashok Savant. [109], Hashem Alkhaldi [111], Luding, S. [122], Mohammad H.A. [123], Mohammad S.E. [124], Zhanfu Li. Xin Tong. [143] та ін.

В монографії [41] доволі докладно проведені дослідження вібраційного руху, матеріальної точки, їх сталість та визначені області існування таких режимів, причому рішення таких задач виконано для процесів сепарації насіннєвих сумішей. Ці дослідження дали можливість на основі запропонованих критеріїв шукати раціональні параметри процесів сепарації насіннєвих сумішей на віброфрикційних сепараторах. Викладені в цій монографії методи та результати вирішення вказаних задач майже повністю описують двомірні процеси на підставі ідеалізованої моделі матеріальної точки, яка рухається в періодичних режимах.

В роботі розглянуті також задачі вібросепарації зернових культур, форму насіння яких запропоновано апроксимувати за допомогою рядів Фур'є. Можливість такої апроксимації підтверджується тим, що геометричні характеристики насіння дуже часто є періодичними функціями

В роботі [38] проведені дослідження вібраційного руху частинок з безперервним підкиданням та визначено швидкості їх транспортування в області існування періодичних режимів руху.

В роботах [20, 22] вперше розглядають моделювання процесу сепарації насіння сепаратором ударної дії з багаторазовими зіткненнями насіння ідеалізованого у вигляді матеріальної точки з похилими деками багатоярусного ударного сепаратора. Встановлена залежність продуктивності

багатоярусного ударного сепаратора від маси насінин та кутів установки дек.

Кобринським А.Е. розглянуті одномасові та багатомасові моделі віброударного руху спрямовані на пошук періодичного руху таких систем. В роботі сформульовані умови періодичного руху та отримані області сталих режимів.

Періодичний рух частинок в процесі вібросепарації з упровадженням зміни напряму коливаньдеки розглянуто в роботі [37]. В роботі [40] розглянуто двухударний режим руху частинки між двома поверхнями, що коливаються, причому для випадку, коли форми цих поверхонь задаються загальними рівняннями.

В роботі [41] з метою уточнення впливу геометричних характеристик поперечного перерізу зерна розглянуто вібраційний рух частинок, форму поперечного перерізу яких можна апроксимувати правильними геометричними фігурами, як твердих тіл, з поперечним перерізом у вигляді трикутника квадрата і оживала, причому центр їх тяжіння не співпадає з геометричним центром тіла.

Розглянуті також питання ударної взаємодії частинок як твердих тіл, форму яких пропонується апроксимувати багатокутником з різними розмірами ребер. Знайдені раціональні режими руху частинок для форми насіння якими можна апроксимувати поперечний переріз насіння гречки.

В роботі [9] розглянуті режими руху твердих тіл по віброфрикційним та ударним поверхням, форму яких можна апроксимувати равником Паскаля та овалом Кассіні. Всі цій же роботі розглянуто ударну взаємодію твердого тіла з похилою відбивною поверхнею. Знайдені кути відбиття частинок від нерухомої поверхні в залежності від коефіцієнта відновлення швидкості та кута падіння, а також залежність траєкторій руху від коефіцієнта відновлення швидкості. При дослідженні удару кулястої частинки з площиною визначено відсоткове відношення енергії пружних коливань від енергії деформації. В цій роботі також розглянуто вплив властивостей оболонки зерна на пружні властивості під час удару.

В роботах [61, 62] розглянута ударна взаємодія твердого тіла з задеформованою механічною системою. Показано, що внаслідок непружного удару, за рахунок миттєвого приросту маси, вихідна задеформована система може набувати коливальні властивості, яких до удару вона не мала, і після удару переходити в осцилятор або залишатись не коливальною.

В роботах [20,60] розглянута ударна взаємодія твердого тіла з пружним півпростором з урахуванням ваги падаючого тіла та встановлено, що з урахуванням гравітації максимум обчисленої сили удару для таких тіл як гарбуз збільшується на 28%, для яблука на 5,77%, а для таких тіл до яких відноситься зерно ріпаку, чи проса, до речі насіння проса співрозмірні з насінням ріпаку, збільшення сили удару практично дорівнює нулю, тому урахуванням сили тяжіння під час удару для таких малих тіл можна знехтувати.

В розглянутих роботах недостатньо приділено уваги ударної взаємодії кулеподібних частинок, як твердих тіл, з нахиленою нерухомою відбивною поверхнею, а також моделюванню удару пружно пластичних тіл сферичними виступами. Не розглянуто також позиційне тертя в моделі удару пружних тіл з урахуванням коефіцієнта відновлення швидкості.

Висновки за розділом 1

1. Стадії визрівання насіння проса в різних і навіть в одних і тих же метелках різноманітні. Тому фракція чистого зерна після основної обробки на повітряно-решітно-триєрних зерноочисних машинах включає окрім інших домішок значну кількість насіння з низькими посівними якостями і важко віддільними домішками насіння щетинника сизого та курячого проса. Додаткова обробка на пневмостолах через подібність питомої ваги насіння не дає повного ефекту розділення при підготовці насіннєвого матеріалу – в суміші залишається значна кількість некондиційного насіння і

важковіддільних домішок.

2. Багаточисельні дослідження, показують для отримання насіння високих посівних кондицій для додаткової обробки необхідно вводити машини, що працюють на основі нових ознак розділення. Одними із таких машин, добре зарекомендувавши себе при сепарації багатьох важковіддільних сумішей сільськогосподарських культур є віброфрикційні сепаратори, в яких розділення відбувається по сукупності фізико-механічних властивостей компонентів суміші: пружності, шерохуватості та формі. Однак ці сепаратори мають два вагомні недоліки: не високу продуктивність і велику енергоємність. Тобто застосовувані на даний час технології і способи очищення насіння проса не забезпечують високої ефективності сепарації. А найбільші труднощі при сепарації викликає відділення насіння курячого проса та щетинника сизого.

3. Серед основних фізико-механічних властивостей насіння проса і важковідокремлюваних бур'янистих рослин найбільші відмінності спостерігаються у їхній пружності, тому підвищення якості процесу сепарації насіння проса за пружністю можливе шляхом збільшення кількості ударних випробувань частинок суміші з робочими поверхнями ударних сепараторів і підвищення, за рахунок цього, вірогідності більш спрямованих у підсумковому рахунку траєкторії руху частинок в робочому органі сепаратора у відповідні фракції.

4. Віброударній сепарації насінневих сумішей, у тому числі ударної присвячена значна кількість робіт. Їх аналіз показує, що у більшості робіт недостатньо уваги приділено ударної взаємодії кулеподібних частинок, з нахиленою відбивною поверхнею та моделюванню удару пружно-пластичних тіл сферичними виступами. Не розглянуто також позиційне тертя в моделі удару пружних тіл з урахуванням коефіцієнта відновлення швидкості.

Виходячи з цього визначені задачі для майбутніх теоретичних досліджень в даній роботі:

- проаналізувати стан існуючих технологій, технічних систем та способів очищення насіння проса та визначити шляхи підвищення процесів його сепарації та удосконалення технічних засобів для реалізації процесу;
- провести експериментальні дослідження основних фізико-механічних властивостей насіння проса та важковідокремлюваних бур'янів;
- провести теоретичні дослідження ударної взаємодії кулеподібних частинок, як твердих тіл, з нахиленою нерухомою поверхнею, що відбиває та удару пружно-пластичних тіл сферичними виступами;
- провести теоретичні дослідження позиційного тертя в моделі удару пружних тіл з урахуванням коефіцієнта відновлення швидкості;
- удосконалити технологічну схему роботи гравітаційних багатоярусного ударного та ударно-фрикційного сепараторів;
- вивчити вплив фізико-механічних властивостей насіння проса та бур'янів та режимів роботи сепараторів на критерії розділення;
- обґрунтувати режими роботи, конструктивні та технологічні параметри сепараторів для обробки насіння проса;
- провести виробничі впровадження застосування сепараторів для технології підготовки насіння проса та визначити їх економічну ефективність.

РОЗДІЛ 2

ТЕОРЕТИЧНІ ПЕРЕДУМОВИ СЕПАРАЦІЇ НАСІННЄВИХ СУМІШЕЙ ЗА ПРУЖНИМИ ТА ФРИКЦІЙНИМИ ВЛАСТИВОСТЯМИ

В першому розділі цієї роботи проаналізовано та доведено, що в науковій літературі приділено недостатньо уваги ударної взаємодії кулеподібних частинок, як твердих тіл, з нерухомою нахиленою відбивною поверхнею.

Насіння проса якраз відноситься до кулеподібних частинок тому в роботі передбачається вивчити процес ударної взаємодії кулеподібних частинок з відбивною поверхнею з урахуванням впливу частоти обертання на відбивання (відскок) частин від ударної поверхні. Розглянемо також позиційне тертя в моделі удару пружних тіл з урахуванням коефіцієнта відновлення швидкості під час удару на станах стискання і розтискання тіл з урахуванням сухого позиційного тертя. А також буде розглянуто моделювання процесу руху твердого тіла після удару об похилу відбивну поверхню у напрямку поперечному до нахилу.

2.1. Ударна взаємодія кулеподібного тіла з нахиленою поверхнею

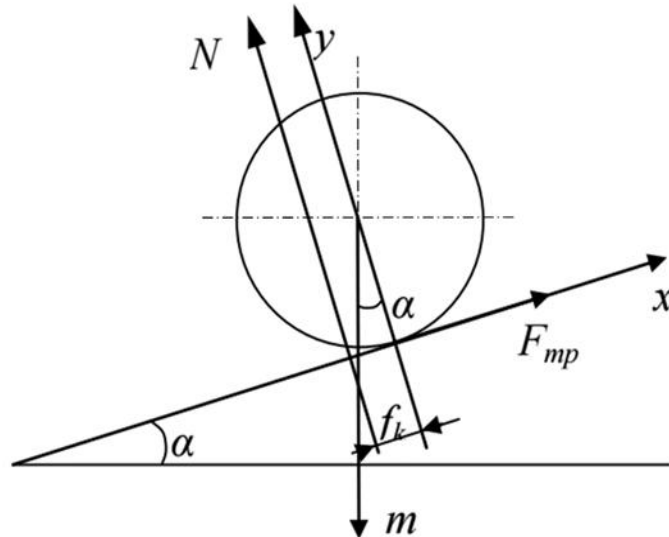
Удар кулястого тіла об похилу площину розглянуто нами в роботі [19]

В теорії сепарації часто використовуються елементи теорії удару, однак у більшості випадків частинки розглядаються у вигляді матеріальних точок без урахування їх геометричних характеристик [22], [37]. Разом з тим при ударі реальних частинок об перешкоду утворюється зминання обох поверхонь, і нормальна реакція поверхні, об яку ударяються частинки, зміщується вперед по ходу руху на величину коефіцієнта кочення.

Під час зіткнення частинки та перешкоди (у нашому випадку – похилої площини) протягом удару відбувається кочення частинки по площині

протягом деякого часу τ . Виникає момент пари тертя, що призводить до повороту частинки.

На рис. 1 представлена схема діючих сил у цьому випадку.



V – швидкість, м/с; F_{mp} – сила тертя ковзання, Н; f_k – коефіцієнт тертя кочення, м; r – радіус кулі, м; N – нормальна реакція площини, Н; α – кут нахилу площини, рад; m – маса кулі, кг; τ – час удару, с

Рисунок 2.1 – Розрахункова схема удару кулястої частинки

Відповідно до схеми момент пари тертя дорівнює

$$\left(mg + \frac{mv}{\tau}\right) f_k \cos \alpha. \quad (2.1)$$

Момент сили тертя

$$r \cdot f_{Tp} \left(mg + \frac{mv}{\tau}\right) \cos \alpha. \quad (2.2)$$

Звідси обертаючий (перекидаючий) момент

$$M_o = m \left(g + \frac{v}{\tau}\right) \cos \alpha (r \cdot f_{Tp} - f_k). \quad (2.3)$$

Наприклад, для гороху [3] при $V=1$ м/с при $V=3 \cdot 10^{-3}$ м, $f_k=10^{-3}$ м, $\alpha=30^\circ$, $\tau=46,9 \cdot 10^{-6}$ с, $m=0,14 \cdot 10^{-3}$ кг, отримаємо $M_o=0,51 \cdot 10^{-3}$ Н.м.

Таким чином, під час удару виникає обертаючий момент, що призводить тіло до обертання під час польоту після відскоку.

Визначимо кутову швидкість обертання кулі, якщо момент інерції щодо осі обертання дорівнює I_z , а центр мас розташований на осі обертання.

При цьому куля обертатиметься під дією пари сил з моментом, що залежить від кутової швидкості $\dot{\varphi}$ обертання: $M_z = M_o - \alpha \dot{\varphi}^2$, де M_o – початковий обертаючий момент, $\alpha \dot{\varphi}^2$ – гальмуючий момент.

Диференціальне рівняння обертання твердого тіла у загальному випадку має вигляд:

$$I_z \ddot{\varphi} = \sum_{k=1}^n M_z(F_k^e), \quad (2.4)$$

де F_k^e – рівнодіюча зовнішніх сил.

До кулі прикладені сили: mg – сила тяжіння тіла, сили опорних реакцій та пара сил з моментом M_z . Відносно осі обертання моменти сили тяжіння та сили опорних реакцій дорівнюють нулю. Отже, сума моментів зовнішніх сил відносно осі обертання дорівнює моменту M_z , тобто

$$\sum_{k=1}^n M_z(F_k^e) = M_o - \alpha \dot{\varphi}^2. \quad (2.5)$$

При цьому диференціальне рівняння обертання буде

$$I_z \ddot{\varphi} = M_o - \alpha \dot{\varphi}^2, \quad (2.6)$$

звідси

$$\ddot{\varphi} = \frac{\alpha}{I_z} \left(\frac{M_o}{\alpha} - \dot{\varphi}^2 \right). \quad (2.7)$$

Розділивши змінні, матимемо:

$$\frac{d\dot{\varphi}}{\frac{M_o}{\alpha} - \dot{\varphi}^2} = \frac{\alpha}{I_z} dt. \quad (2.8)$$

Після інтегрування отримаємо:

$$\frac{1}{2} \sqrt{\frac{\alpha}{M_o}} \ln \frac{\sqrt{\frac{M_o}{\alpha} + \dot{\varphi}}}{\sqrt{\frac{M_o}{\alpha} - \dot{\varphi}}} = \frac{\alpha}{I_z} t + c. \quad (2.9)$$

За початкових умов $t = 0$, $\dot{\varphi} = 0$, $c = 0$.

Тоді:

$$\ln \frac{\sqrt{\frac{M_o}{\alpha} + \dot{\varphi}}}{\sqrt{\frac{M_o}{\alpha} - \dot{\varphi}}} = \frac{2}{I_z} \sqrt{\alpha M_o} t. \quad (2.10)$$

Звідси отримуємо

$$\dot{\varphi} = \sqrt{\frac{M_0}{\alpha} \frac{1 - e^{\frac{2}{I_Z} \sqrt{\alpha M_0} t}}{1 + e^{\frac{2}{I_Z} \sqrt{\alpha M_0} t}}}. \quad (2.11)$$

У докторській дисертації Богомолова О.В. обчислено згасання обертання частинки з урахуванням тертя поверхні по повітряному середовищу, звідки для нашого випадку отримаємо $\alpha = 0,4 \cdot 10^{-6} \text{ кг} \cdot \text{м}^2$, підставивши це значення в (1), матимемо $\dot{\varphi} = 36 \text{ 1/с}$.

Таким чином, після удару частинка обертається з кутовою швидкістю 36 1/с. З (1) при $t = 0$, отримаємо $\dot{\varphi} = \omega = \sqrt{\frac{M_0}{\alpha}}$, тобто, протягом цього часу частинка обертається з постійною кутовою швидкістю. При ударі тіла, що обертається, об площину (перешкоду) обчислимо час його обертання при контакті з поверхнею. Частинка обертається рівно уповільнено під дією сили тертя. Можна написати

$$V_t = V_0 - \omega t, \quad (2.12)$$

де V_t – лінійна швидкість,

ω – кутове прискорення.

Прискорення ω викликається силою тертя

$$F_{\text{тр}} = kF = m\omega. \quad (2.13)$$

Для випадку удару об похилу площину

$$F = F_0 \cos \alpha, \quad (2.14)$$

де F_0 – сила удару об горизонтальну площину. У випадку гороху при $V=1 \text{ м/с}$, $F_0 = 6 \text{ Н}$.

Враховуючи, що $V_t = \omega r$, знаходимо

$$t = \frac{V_0}{\omega} = \frac{\omega r \cdot m}{kF} = \frac{\omega r \cdot m}{kF_0 \cos \alpha}. \quad (2.15)$$

За цей час число обертів частинки становитиме

$$n = \frac{\varphi}{2\pi} = \frac{1}{2\pi} \left(\omega t - \frac{\varepsilon t^2}{2} \right), \quad (2.16)$$

де ε – дотичне кутове прискорення, що дорівнює ω/t , звідки після підстановки (2.15) в (2.16), отримаємо

$$n = \frac{1}{2\pi} \left(\omega t - \frac{\omega t}{2} \right) = \frac{\omega^2 \cdot r \cdot m}{4\pi \cdot k \cdot F_0 \cos \alpha}. \quad (2.17)$$

Підставляючи чисельні значення (2.15) і (2.16), отримаємо

$$t=6,93 \cdot 10^{-6} \text{ с},$$

$$n=19,86 \cdot 10^{-6} \text{ об.}$$

Для проса та ріпаку ці значення становитимуть $t=1,27 \cdot 10^{-7} \text{ с}$, $n=2,1 \cdot 10^{-7} \text{ с}$. Тому що їх розміри та маса практично однакові.

Отже, під час удару частинка, що обертається, припиняє обертання практично миттєво, і відбивання відбувається так, як би частка ударялася без обертання. Втрата енергії при ударі становитимуть $\frac{I_z \omega^2}{2} = 19 \cdot 10^{-14} \text{ Дж}$ для гороху, а ще менші $2,1 \cdot 10^{-15} \text{ Дж}$ для проса та ріпаку. Цими втратами можна знехтувати в порівнянні з потенційної енергією стискування частинки при ударі, тобто коефіцієнт відновлення швидкості не зміниться.

Однак слід звернути увагу на таку обставину. З аналізу формули (2) видно, що час до зупинки обертання залежить від частоти обертання, коефіцієнта тертя та кута нахилу площини (для цієї частинки). При сепарації на ударних сепараторах частота обертання незначно коливається, коефіцієнт тертя, як правило, змінюється в межах $\kappa=0,3 \div 0,4$. Тому представляє інтерес вивчення впливу кута нахилу. Знайдемо граничний кут нахилу, у якому відбиття немає. Це станеться тоді, коли не припиняється обертання частинки під час контакту під час удару. З геометричних, кінематичних параметрів для округлих частинок таких як гороху, проса та ріпаку отримаємо граничний кут $\alpha=75^\circ$, тобто межу, за якою відбиття (відскок) частинки зникає, і частинка сповзає або скочується по площині.

Розглянемо тепер ситуацію, коли падаюча частинка обертається навколо осі, паралельної похилій площині. Відповідно до закону збереження енергії будемо мати для першої фази удару:

$$\frac{mv_1^2}{2} + \frac{I\omega_1^2}{2} = U_n + D_{\text{вр}}, \quad (2.18)$$

де U_n – потенційна енергія стиснення частки;

$D_{\text{вр}}$ – дисипативна функція від обертання частки під час контакту.

$$U_n = kh^{5/2} [3], \quad (2.19)$$

$$\text{де: } k = \frac{4}{5D} \sqrt{R}, D = \frac{3}{4} \left(\frac{1-\sigma^2}{E} + \frac{1-\sigma_1^2}{E_1} \right), h = \left(\frac{m}{k} \right)^{2/5} V^{4/5},$$

σ, σ_1 – коефіцієнт Пуассона частинки, матеріалу та площини

E, E_1 – модуль Юнга відповідно.

$$D_{\text{вр}} = f_{\text{тр}} \cdot F \cdot r \cdot 2\pi \cdot n, \quad (2.20)$$

де: $f_{\text{тр}}$ – коефіцієнт тертя;

F – сила удару, Н;

r – радіус частинки, м;

n – число обертів частинки під час контакту.

Після підстановки в (2.18) з урахуванням параметрів отримаємо $n=0,0007$ об, тобто можна вважати, що число обертів частини під час контакту дорівнює нулю.

2.2. Позиційне тертя в моделі удару пружних тіл з рахуванням коефіцієнта відновлення швидкості

Позиційне тертя в моделі удару пружних тіл з рахуванням коефіцієнта відновлення швидкості під час удару розглянуто нами в роботі [128] та наведено нижче.

Удар твердих тіл відноситься до швидкоплинних механічних процесів. Але, не зважаючи на малу тривалість, при ударі виникають великі значення сил динамічної взаємодії тіл, що може призвести до руйнування елементів конструкцій, особливо виготовлених із крихких матеріалів. Так виникає проблема забезпечення міцності скла літаків при зіткненні в повітрі з птахом, міцності обшивок і скла інших транспортних засобів. При ударі градом пошкоджуються плоди овочів і фруктів, що теж становить певну проблему і потребує відповідних розрахунків. Вони потрібні також у випадках, коли механічних удар є основною складовою технологічного процесу, наприклад,

кування, деталей молотом у машинобудуванні, забивання паль у будівництві, використання відбійних молотків у гірничій справі і т.д. З використанням механічного удару пов'язані також деякі способи сепарування насінневих сумішей у сільськогосподарському виробництві. Отже, механічний удар часто зустрічається в життєдіяльності людей і його моделювання відноситься до актуальних науково-прикладних задач.

Існує декілька варіантів теорії удару [60,63,112]. Історично першою виникла стереомеханічна теорія, яка ґрунтується на загальних теоремах механіки й енергетичних принципах. Важливою фізичною характеристикою в цій теорії є коефіцієнт відновлення швидкості, який часто використовують у розрахунках. Але стереомеханічна теорія не дає можливості визначити тривалість удару та силу ударної взаємодії, бо в ній удар вважають миттєвим, а замість сили використовують поняття її імпульсу. Другим варіантом можна вважати хвильову теорію удару, де вивчають поширення в тілах, підданих удару, пружних і пружно-пластичних хвиль. Визначення сили удару та його тривалості стало можливим з появою варіанту квазістатичної теорії, де передбачено, що за час удару хвилі проходять декілька разів відстань, що характеризує розмір тіла. Велике практичне застосування набув гібридний варіант теорії, в якій поєднано квазістатична і хвильова теорії удару.

Другий поширений напрям удосконалення теорій полягає в заміні пружних тіл на в'язкопружні. Така модель започаткована в [7, 113] і з певними варіаціями розглянута в [60, 61]. У цій моделі коефіцієнт відновлення швидкості залежить від початкової швидкості удару, що підтверджується на практиці [9, 113], де він зменшується зі збільшенням швидкості зіткнення тіл. Третій напрям модифікації класичної теорії полягає в урахуванні гістерезисних втрат енергії при динамічному деформуванні тіл [67]. В моделі такого типу коефіцієнт відновлення швидкості менший одиниці, але він не залежить від швидкості удару, що є певним недоліком моделі. Четвертий напрям, пов'язаний з урахуванням сухого тертя [127, 128],

яке можна вважати позиційним, бо значення сили тертя там залежить від переміщення тіл. Незважаючи на недоліки, така модель досить простою і, при належній ідентифікації значень коефіцієнтів в ній, може дати адекватні результати. Далі реалізуємо цей напрям, але, на відміну від загального розв'язку задачі в квадратурах будуємо замкнений аналітичний розв'язок, обмежившись класом степеневих нелінійностей, що відповідає теорії нелінійних коливань [103, 104, 132, 133], а останнім часом і в теорії механічного удару [59,127]. Внаслідок наявності компактних апроксимацій названих спеціальних функцій, не виникає труднощів при числовій реалізації аналітичного розв'язку. Том дослідження спрямовуємо на побудову такого розв'язку.

Метою роботи є розробка математичної моделі дисипативного колінеарного удару пружних тіл з позиційним тертям, яка враховує результати експериментального визначення коефіцієнта відновлення швидкості.

Зазначимо, що його визначення відноситься до найбільш простих завдань при вимірюванні параметрів швидкоплинного механічного процесу.

В запропонованій моделі враховані залежність коефіцієнта відновлення швидкості від початкової швидкості удару і це підвищує адекватність модернізованої теорії, порівняно з її класичним варіантом.

Для досягнення поставленої мети передбачено розв'язання наступних завдань:

1. Математичне моделювання динамічного стискання тіл.
2. Математичне моделювання динамічного розтискання тіл.
3. Проведення розрахунків і порівняльний аналіз числових результатів.

Моделювання ґрунтується на теорії нелінійних диференціальних рівнянь, побудові їх точних аналітичних розв'язків в спеціальних функціях і апроксимації спеціальних функцій елементарними функціями.

2.2.1. Математичне моделювання динамічного стискання тіл

У відповідності з квазістатичною теорією удару цей процес описуємо диференціальним рівнянням:

$$M\ddot{x} + c_1 x^a = 0, \quad (2.21)$$

у якому $M = \frac{m_1 m_2}{m_1 + m_2}$, m_1, m_2 – маси тіл, задіяних в ударі; x – зближення центрів мас тіл, як функція часу t ; $c_1 = c + \Delta c$, $c > 0$, $a > 0$ – константи, що залежать від матеріалів тіл і форми граничних поверхонь в області їх контакту, відповідно з розв’язком контактної задачі теорії пружності; $\Delta c > 0$ – стала позиційного тертя; крапка над x означає похідну по t .

Припускаємо, що коефіцієнт відновлення швидкості K визначено експериментально. Тоді сталу Δc легко обчислити за формулою:

$$\Delta c = \frac{1 - K^2}{1 + K^2} c$$

Вважаючи, що зіткнення тіл відбувається з швидкістю V_0 , рівняння (2.21) доповнює початковими умовами:

$$x(0) = 0; \dot{x}(0) = V_0. \quad (2.22)$$

Щоб одержати аналітичний розв’язок задачі, поданої виразами (2.21), (2.22), рівнянню (1) надаємо вигляд:

$$x \frac{dx}{dt} = -\frac{c_1}{M} x^a.$$

Після розділення в ньому змінних, отримуємо:

$$x dx = \frac{c_1}{M} x^a dx.$$

Подальшим інтегруванням знаходимо з точністю до сталої c :

$$x^2 = c - \frac{2c_1}{M} \frac{x^{a+1}}{a+1}.$$

Враховуючи початкові умови (2.38) визначаємо невідому сталу c , вона дорівнює v_0^2 . Отже

$$x = \frac{dx}{dt} = v_0 \sqrt{1 - \frac{2c_1}{Mv_0^2} \frac{x^{a+1}}{a+1}}.$$

При досягненні максимального стискання $x = x_c$, швидкість зближення

тіл $x=0$. Тому з останньої формули випливає, що:

$$x_c = \left[\frac{Mv_0^2}{2c_1} (a+1) \right]^{\frac{1}{a+1}}.$$

Це вираз максимального стискання тіл при ударі.

Подальшим інтегруванням швидкості x отримуємо:

$$\int_0^x \frac{dy}{\sqrt{1 - \frac{2c}{Mv_0^2} \frac{y^{\alpha+1}}{\alpha+1}}} = v_0 t$$

Переходом до нової змінної інтегрування $u=y/x_c$ другий інтеграл рівняння (1) зводимо до наступного:

$$\int_0^{x/x_c} \frac{du}{\sqrt{1-u^{\alpha+1}}} = \frac{v_0 t}{x_c}.$$

Ліва частина його є інтегральним поданням Атеб-синуса [62]. Тому аналітичний розв'язок рівняння (2.21), з урахуванням початкових умов (2.22), виражається через цю спеціальну функцію і має вигляд:

$$x(t) = x_c Sa(a, 1; \frac{1+a}{2} \cdot \frac{v_0 t}{x_c}). \quad (2.23)$$

Тривалість процесу стискання t_c , в кінці якого $x=x_c$, становить

$$t_c = \frac{lx_c}{v_0}, \quad (2.24)$$

причому:

$$I = \int_0^1 \frac{du}{\sqrt{1-u^{\alpha+1}}} = \frac{\sqrt{\pi}}{\alpha+1} \cdot \frac{\Gamma\left(\frac{1}{\alpha+1}\right)}{\Gamma\left(\frac{\alpha+3}{2\alpha+2}\right)}, \quad (2.25)$$

де $\Gamma(z)$ – затабульовані гама функції.

Для обчислення сили стискання тіл $P(t)$ маємо формулу:

$$P(t) = c_1 x^a = P_c \left[Sa(a, 1; \frac{1+a}{2} \cdot \frac{v_0 t}{x_c}) \right]^a. \quad (2.26)$$

де: $P(t) = c_1 x^a = c_1^{\frac{1}{t+a}} \left[\frac{Mv_0^2}{2} (a+1) \right]^{\frac{a}{a+1}}$ – максимальне значення сили $P_c = P(t_c)$.

2.2.2. Математичне моделювання динамічного розтискання тіл

Воно відбувається на проміжку $t \in (t_c; t_y)$ і описується диференціальним рівнянням:

$$M\ddot{x} + c_2 x^\alpha = 0, \quad (2.27)$$

у якому $c_2 = c - \Delta c$.

Початковими умовами до (2.27) є:

$$x(t_c) = x_c, \quad \dot{x}(t_c) = 0. \quad (2.28)$$

Задача, подана виразами (2.27) і (2.28), відрізняється від розв'язаної раніше початковими умовами. Тому доводиться заново будувати її аналітичний розв'язок. Перший інтеграл рівняння (2.27), з урахуванням умов (2.28), має вигляд:

$$\dot{x} = \frac{dx}{dt} = \sqrt{\frac{2c_2}{M(\alpha+1)}} \sqrt{x_c^{\alpha+1} - x^{\alpha+1}}.$$

Другим його інтегралом є:

$$\int_{x_c}^x \frac{dy}{\sqrt{x_c^{\alpha+1} - y^{\alpha+1}}} = \sqrt{\frac{2c_2}{M(\alpha+1)}} (t - t_c).$$

Далі перейдемо до нової змінної інтегрування $\xi = y/x_c$ і приймемо до уваги, що:

$$c_2 = c_1 K^2; \quad \sqrt{\frac{2c_2}{M(\alpha+1)}} = \frac{Kv_0}{x_c^{\frac{\alpha+1}{2}}}.$$

Тоді, другий інтеграл рівняння руху набуває форму:

$$\int_1^{\xi/x_c} \frac{d\xi}{\sqrt{1 - \xi^{\alpha+1}}} = \frac{Kv_0}{x_c} (t - t_c).$$

Ліва частина його є інтегральним поданням Атеб-синуса [62]. Отже, аналітичний розв'язок задачі на етапі розтискання виражається через цю спеціальну функцію і має вигляд:

$$x(t) = x_c Ca\left(\alpha, 1; \frac{1+\alpha}{2} \cdot \frac{Kv_0}{x_c} (t-t_c)\right), \quad (2.29)$$

Обчислення сили удару при розтисканні тіл зводиться до використання формули:

$$P(t) = P_c^* \left[Ca\left(\alpha, 1; \frac{1+\alpha}{2} \cdot \frac{Kv_0}{x_c} (t-t_c)\right) \right]^\alpha, \quad (2.30)$$

у якій $P_c^* = c_2 x_c^\alpha = c_2 \left(\frac{Mv_0^2}{2} \cdot \frac{\alpha+1}{c_1} \right)^{\frac{1}{\alpha+1}}.$

При $t = t_c$ сила динамічної взаємодії тіл має скачок висотою:

$$\Delta P = P_c - P_c^* = (c_1 - c_2) x_c^\alpha = 2(\Delta c) x_c^\alpha.$$

Процес розтискання тіл закінчується при:

$$t = t_y = t_c + \frac{x_c}{Kv_0} I = \left(1 + \frac{1}{K}\right) \frac{x_c}{v_0} I. \quad (2.31)$$

Це формула тривалості удару.

2.2.3. Результати обчислень параметрів удару та їх порівняльний аналіз

Використовуючи викладену теорію, проведено її числову реалізацію. Для обчислень $x(t)$ і $P(t)$ по формулах (2.23), (2.26) і (2.29), (2.30) треба мати значення періодичних Атеб-функцій. Якщо обмежитись наближеними результатами, то ці значення досить просто одержувати за допомогою апроксимацій їх на першій чверті періоду $\eta \in [0; I]$:

$$\begin{aligned} Sa\left(\alpha, 1; \frac{1+\alpha}{2} \eta\right) &\approx \sin\left(\frac{\pi\eta}{2I} + B \sin \frac{\pi\eta}{I} + C \sin \frac{2\pi\eta}{I}\right); \\ Ca\left(\alpha, 1; \frac{1+\alpha}{2} \eta\right) &\approx \cos\left(\frac{\pi\eta}{2I} - B \sin \frac{\pi\eta}{I} + C \sin \frac{2\pi\eta}{I}\right). \end{aligned} \quad (2.32)$$

Тут:

$$B = \arcsin \left[Sa \left(\alpha, 1; \frac{1+\alpha}{2} \cdot \frac{I}{2} \right) \right] - \frac{\pi}{4};$$

$$C = \arcsin \left[Sa \left(\alpha, 1; \frac{1+\alpha}{2} \cdot \frac{I}{4} \right) \right] - \frac{\pi}{8} - B \sin \frac{\pi}{4};$$

де I – визначено за формулою (2.25).

Розглянемо приклади.

Приклад 1. Вхідні дані беремо такі: $M = 0,1$ кг; $E_1 = 0,8 \cdot 10^7$ Па; $\nu_1 = 0,5$; $E_2 = 2750 \cdot 10^7$ Па; $\nu_2 = 0,15$; $c = 2,1873 \cdot 10^6$ Нм^{-3/2}; $K = 0,73$; $\alpha = 3/2$. Для цих даних $c_1 = 2,8538 \cdot 10^6$ Нм^{-3/2}; $c_2 = 1,5208 \cdot 10^6$ Нм^{-3/2}.

Обчислені значення характеристик при ударі гумової кулі по бетонному півпростору з різними швидкостями наведено в табл. 2.1.

Таблиця 2.1 – Характеристики удару при різних v_0 ($K = 0,73$)

v_0 , м/с	$10^3 x_c$, м	P_c , Н	P_c^* , Н	$10^3 t_c$, с	$10^3 t_y$, с
1	1,139	109,70	58,46	1,676	3,972
2	1,983	252,00	134,30	1,459	3,458
3	2,743	409,98	218,48	1,346	3,190
4	3,453	579,05	308,59	1,270	3,010
5	4,128	756,89	403,36	1,215	2,879

Користуючись формулами (2.24) і (2.31), при визначенні t_c і t_y , в формулі (2.41) задавали: $\Gamma(0,4) \approx 2,21825$; $\Gamma(0,9) \approx 1,06867$. Тому $I \approx 1,47164$.

З метою порівняння результатів використовуємо графіки $P(t)$ і $x(t)$ (рис. 2.2), наведені в роботі В.В. Лапшина. Результати, що надані в табл.2.1 цілком узгоджуються з тими, що на графіках (рис. 2.2), бо співпадають на них як екстремальні точки.

Щоб оцінити вплив позиційного тертя на процес удару, в табл.2.2 наведено результати розрахунків за класичною теорією коли

$$K = 1; c_1 = c_2 = c; P_c = P_c^*; t_y = 2t_c$$

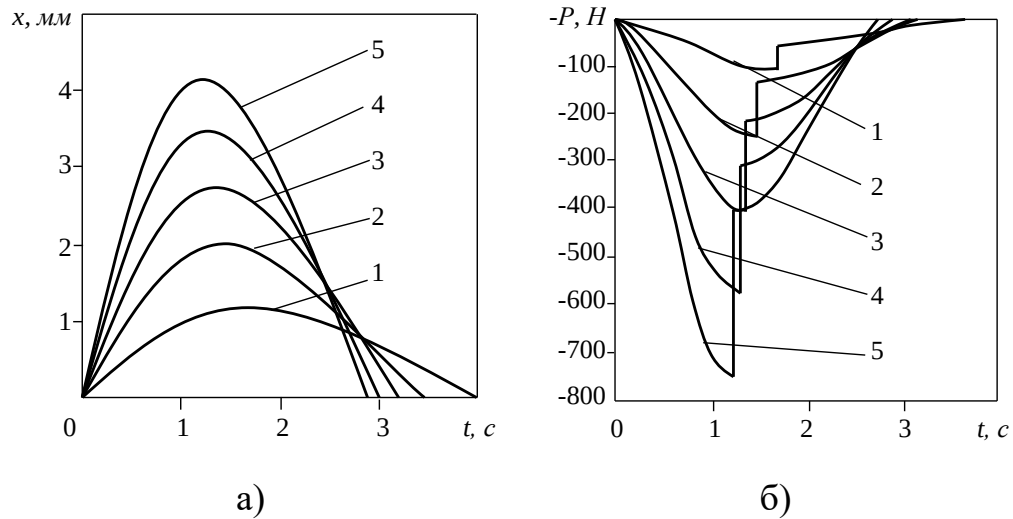


Рисунок. 2.2 – Залежності деформації (а) та контактної сили (б) від часу при $v_0 = 1(1), 2(2), 3(3), 4(4), 5(5)$ м/с

Таблиця 2.2 – Характеристики удару при різних v_0 ($K = 1$)

v_0 , м/с	$10^3 x_c$, м	$P_c = P_c^*$, Н	$10^3 t_y$, с
1	1,267	98,64	3,729
2	2,206	226,63	3,246
3	3,051	368,61	2,993
4	3,841	520,69	2,826
5	4,592	680,57	2,703

Порівнянням результатів в табл. 2.1 і табл. 2.2 встановлено, що врахування позиційного тертя призводить до зменшення максимального стискання тіл, збільшення максимуму сили удару та процесу стискання в часі.

Для обчислення $x(t)$ і $P(t)$ за формулами (2.23), (2.26) і (2.29), (2.30) треба мати значення періодичних Атеб-функцій. Їх можна одержати за формулами (2.32), в яких треба покласти: $\alpha = \frac{3}{2}$; $B = -0,02613$; $C = -0,00207$; $I = 1,47164$.

Інформація про точність апроксимацій (12) наведена в табл. 2.3, де поряд з умовно точними (до 10^{-4}), в дужках наведені наближені значення періодичних Атеб-функцій в першій чверті їх періоду.

Апроксимації (2.32) забезпечують точність в три значущих цифри після коми.

Таблиця 2.3 – Точні та наближені значення Ateb-функцій

$\frac{\eta}{I}$	$10 \cdot Sa\left(\frac{3}{2}, 1; \frac{5}{4}\eta\right)$	$10 \cdot Ca\left(\frac{3}{2}, 1; \frac{5}{4}\eta\right)$
0,0	0,000 (0,000)	10,000 (10,000)
0,1	1,470 (1,472)	9,865 (9,866)
0,2	2,924 (2,945)	9,466 (9,468)
0,3	4,334 (4,333)	8,818 (8,821)
0,4	5,667 (5,665)	7,947 (7,949)
0,5	6,884 (6,884)	6,884 (6,884)
0,6	7,947 (7,949)	5,667 (5,665)
0,7	8,818 (8,821)	4,334 (4,333)
0,8	9,466 (9,468)	2,924 (2,925)
0,9	9,865 (9,866)	1,470 (1,472)
1,0	10,000 (10,000)	0,000 (0,000)

Не складно переконатись, що дані, які наведені в табл.2.3, відповідають графікам $x(t)$, (рис.2.2).

Приклад 2. Зберігаючи попередні характеристики матеріалів та масу тіла, що вдаряє по півпростору, змінимо в прикладі 1 лише контактну поверхню другого порядку на контактну поверхню четвертого порядку $z_1 = Ar^4$, де $A > 0$, r – радіальна координата (рис.2.3.).

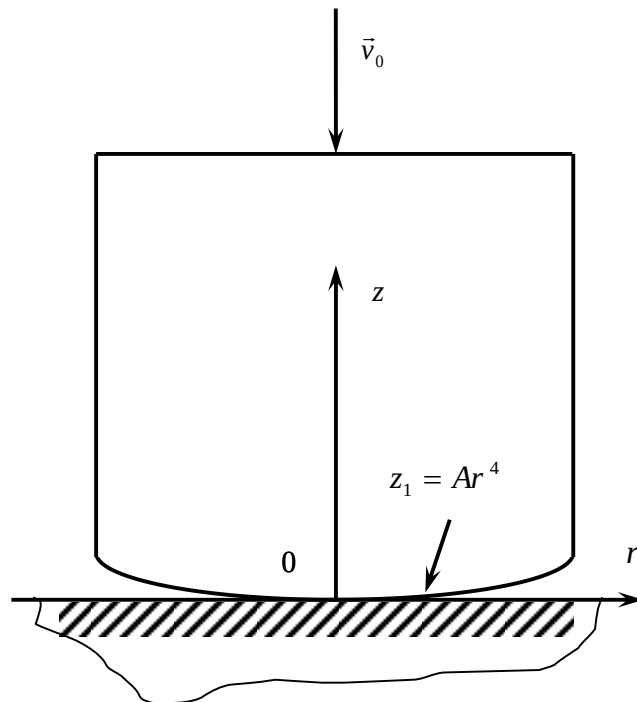


Рисунок 2.3 – Схема контактної взаємодії тіл, обмежених гладенькими поверхнями

Використовуючи розв'язок І.Я.Штаєрмана, для обчислення жорсткості системи отримаємо формулу:

$$C = \frac{8}{5(Q_1 + Q_2)} \left(\frac{3}{8A} \right)^{1/4},$$

$$\text{в якій } Q_1 = \frac{1 - \nu_1^2}{E_1}, \quad Q_2 = \frac{1 - \nu_2^2}{E_2}.$$

Сила взаємодії тіл P теж залишається степеневою функцією зближення центрів мас тіл:

$$P = C \cdot x^\alpha, \quad (2.33)$$

$$\text{де: } \alpha = 5/4.$$

Але при урахуванні позиційного тертя, як і раніше на етапі стискання треба замінити c на c_1 , а на етапі розтискання – c на c_2 .

Нехай геометричний параметр $A = 10^4 \text{ м}^{-3}$, а удар тіл відбувається з початковою швидкістю $v_0 = 5 \text{ м/с}$. При таких числових даних: $c = 1,3350 \cdot 10^6 \text{ Нм}^{-5/4}$; $c_1 = 1,7418 \cdot 10^6 \text{ Нм}^{-5/4}$; $c_2 = 0,9282 \cdot 10^6 \text{ Нм}^{-5/4}$. Розраховані параметри удару становлять: $x_c = 0,002666 \text{ м}$; $P_c = 1055,05 \text{ Н}$; $P_c^* = 562,23 \text{ Н}$; $t_y = 0,001916 \text{ с}$. Вони суттєво відрізняються від тих, що наведені в табл. 2.1 при $v_0 = 5 \text{ м/с}$. Отже, геометрія граничних поверхонь в області контакту може суттєво впливати на характеристику удару. Щоб мати $x(t)$ і $P(t)$, у випадку $\alpha = 5/4$, треба знати значення $Sa\left(\frac{5}{4}, 1; \frac{9}{8} \cdot \frac{v_0 t}{x_c}\right)$ і $Ca\left(\frac{5}{4}, 1; \frac{9}{8} \cdot \frac{v_0 t}{x_c}\right)$. Наближено їх можна обчислювати за формулами (2.32), але в них треба покласти: $B = -0,01350$; $C = -0,00139$; $I = 1,51640$. Значення I обчислювали за формулою (2.25), прийнявши до уваги, що $\Gamma\left(\frac{4}{9}\right) \approx 1,99289$, а $\Gamma\left(\frac{17}{18}\right) \approx 1,03529$.

Інформація про точність такої тригонометричної апроксимації наведена в табл. 2.4, де поряд з точними значеннями, в дужках наведені результати використання формул (2.32).

Таблиця 2.4 – Точні та наближені значення спеціальних функцій

$\frac{\eta}{I}$	$10 \cdot Sa\left(\frac{5}{4}, 1; \frac{9}{8}\eta\right)$	$10 \cdot Ca\left(\frac{5}{4}, 1; \frac{9}{8}\eta\right)$
0,0	0,000 (0,000)	10,000 (10,000)
0,1	1,513 (1,512)	9,871 (9,872)
0,2	3,001 (3,002)	9,488 (9,490)
0,3	4,431 (4,431)	8,864 (8,866)
0,4	5,768 (5,767)	8,017 (8,019)
0,5	6,975 (6,975)	6,975 (6,975)
0,6	8,017 (8,019)	5,768 (5,767)
0,7	8,864 (8,866)	4,431 (4,431)
0,8	9,488 (9,490)	3,001 (3,002)
0,9	9,871 (9,872)	1,513 (1,512)
1,0	10,000 (10,000)	0,000 (0,000)

Як бачимо, відмінності точних і наближених значень Ateb-функцій в цій таблиці не суттєві.

Приклад 3. По аналогії з дослідженнями [127], розглянемо колінеарний удар тіл, коли на граничній поверхні одного із них є особлива точка, в якій знаходиться нескінченна кривизна поверхні. При цьому додатково врахуємо позиційне тертя, що відповідає заданому коефіцієнту відновлення швидкості. Рівняння поверхні з сингулярною точкою має вигляд $z_1 = Ar^{\frac{3}{2}}$, де $A > 0$, r – радіальна координата (рис.2.4).

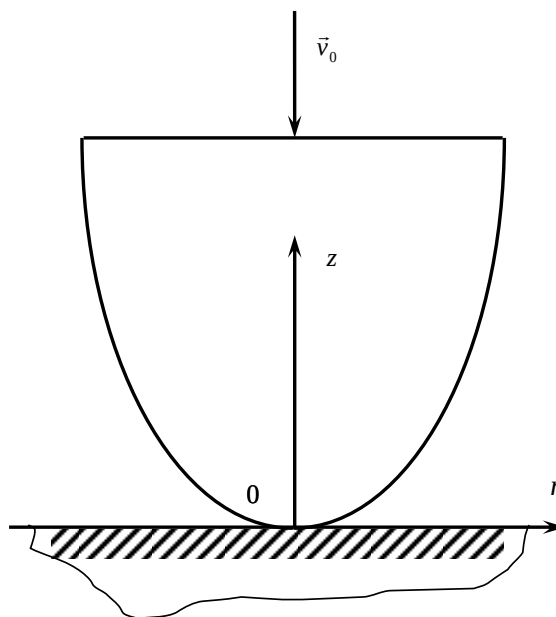


Рисунок. 2.4 – Контакт тіл з сингулярною точкою на поверхні

Для обчислення жорсткості системи маємо формулу [127]:

$$C \approx \frac{0,81180}{A^{\frac{2}{3}}(Q_1+Q_2)}.$$

Сила удару, як і в формулі (2.4) залишається степеневою функцією x , але тепер у ній $\alpha = \frac{5}{3}$.

Для проведення розрахунків залишаємо ті вхідні дані, що й в попередніх прикладах, задавши $A = 5 \text{ м}^{-1/2}$; $K = 0,73$. Цим даним відповідає: $c = 2,9603 \cdot 10^6 \text{ Нм}^{-5/3}$; $c_1 = 3,8624 \cdot 10^6 \text{ Нм}^{-5/3}$; $c_2 = 2,0582 \cdot 10^6 \text{ Нм}^{-5/3}$. При початковій швидкості удару $v_0 = 5 \text{ м/с}$ маємо: $x_c = 5,3212 \cdot 10^{-3} \text{ м}$; $P_c = 626,4273 \text{ Н}$; $P_c^* = 333,8113 \text{ Н}$; $t_y = 3,647 \cdot 10^{-3} \text{ с}$. При обчисленні t_y за формулою (11) враховували, що в формулі [127] $I = 1,445927$. У третьому прикладі значення x_c більше, а значення P_c і P_c^* менші, ніж у попередніх прикладах, що є наслідком зменшення жорсткості системи через наявність сингулярної точки в області контакту тіл. Для розрахунку $x(t)$ і $P(t)$ потрібно обчислювати значення $Sa\left(\frac{5}{3}, 1; \frac{4}{3} \cdot \frac{v_0 t}{x_c}\right)$ і $Ca\left(\frac{5}{3}, 1; \frac{4}{3} \cdot \frac{v_0 t}{x_c}\right)$. Для цього можна скористуватися формулами (2.32), в яких тепер $B = -0,03408$; $C = -0,00226$; $I = 1,51640$.

Щоб отримати інформацію про похибки формул (2.32), порівнювали апроксимовані значення з точними, які одержано за формулою [127] числовим інтегруванням рівняння удару на комп'ютері. Результати порівняння апроксимованих значень з точними наведено в табл.2.5

Таблиця 2.5 – Точні та апроксимовані значення відношення $\frac{x(t)}{x_c}$

$\frac{v_0 t}{x_c}$	Значення $\frac{x(t)}{x_c}$ за		$\frac{v_0 t}{x_c}$	Значення $\frac{x(t)}{x_c}$ за	
	ф. [19]	ф. (3), (12)		ф. [19]	ф. (3), (12)
0,3615	0,3582	0,3582	1,0845	0,9149	0,9153
0,7230	0,6826	0,6826	1,4459	1,0000	1,0000

Аналізом таблиці 2.5 доведено гарну узгодженість результатів обчислень $x(t)$ двома способами.

Розрахунками за формулою (2.32) підтверджено високу точність наближень. Тому числова реалізація формул (2.23), (2.26) і (2.29), (2.30) не викликає ускладнень.

Розроблена дисипативна модель удару є досить загальною. Вона дає можливість проводити розрахунки колінеарного удару твердих тіл, обмежених різними поверхнями. Урахування позиційного тертя не змінює показник нелінійності системи. Він залишається таким як і при ударі ідеально пружних тіл, але в дисипативній моделі кількісно відрізняються процес динамічного стискання і розтискання тіл, завдяки різним жорсткостям системи на цих етапах. Оскільки в запропонованій моделі коефіцієнт відновлення швидкості задається як вхідний параметр то апріорі враховується його залежність від швидкості удару, на яку орієнтовано розрахунок.

Тому викладена теорія позбавлена недоліку відомих дисипативних моделей удару, в яких не задають, а обчислюють коефіцієнт відновлення швидкості, відповідно до визначених характеристик жорсткості системи на етапах динамічного стискання і розтискання тіл [115].

В таких моделях коефіцієнт відновлення швидкості не залежить від швидкості удару, що протирічить відомим експериментальним даним. Отже, внаслідок зміни постановки задачі, тут вдалося усунути цей недолік теорії, тобто поліпшити її адекватність.

2.3. Моделювання ударного руху частинки по похилій площині з подачею у поперечному напрямку

Методи сепарації сипких матеріалів, за знаками подільності, які на даний час застосовуються в відомих сепараторах, особливо, якщо вони застосовуються не в комплексі, незавжди дозволяють відсепарувати з сипкої суміші різноманітні домішки, якими вона засмічена і, як правило, ця

проблема виникає при засміченості важко відокремлюваними домішками. Вибір ознаки подільності є особливо важливим при підготовці посівного матеріалу, тому що з усієї маси насіння отриманого при збиранні необхідно вибрати насіннєвий матеріал, який має найбільший біологічний потенціал закладений в ньому генетично. Ця задача, як правило, вирішується із застосуванням комплексу ознак подільності, що приводить до зниження продуктивності сепарації збільшенню енергії витрат та травмованості зерна, тому правильний вибір та обґрунтування ознаки подільності, яка є найбільш ефективною і розглядається нами в роботі [39] та основні її результати наведені нижче.

Результат розподілу сипких матеріалів на фракції залежить від обраної ознаки розподілу. Якщо, наприклад, основна фракція і домішки відрізняються за розмірами, то ознакою розподілу може бути товщина, ширина або довжина частинок. В цьому разі застосовують решітні очисні машини чи трієри. На решетах з довгастими отворами суміші розділяють по найменшому розмірі (товщині), на решетах з круглими отворами – по середньому розмірі (ширині), а для розподілу по найбільшому розміру (довжині) застосовують трієри. Якщо фракції суміші за розмірами майже не відрізняються, то для їх розподілу застосовують інші ознаки: шорсткість, волохатість поверхні, форма, питома вага, колір, коефіцієнт парусності тощо. Особливо важливим є вибір ознаки розподілу для підготовки посівного матеріалу. Необхідно з усієї маси насіння, отриманого при збиранні, відібрати насіннєвий матеріал, що має найбільшу біологічну цінність. Сюди повинне увійти насіння, яке після висіву реалізує біологічний потенціал, закладений в ньому генетично. Але вказана задача в повній мірі вирішується не завжди просто. Іноколи вона змушує застосовувати по черзі кілька ознак розподілу підряд, що знижує продуктивність і може привести до збільшення пошкоджень зерна. В цих умовах на першому плані стоїть правильний вибір чи обґрунтування нової ознаки розподілу, яка є найбільш ефективною. На наш погляд ефективною ознакою розподілу може бути момент інерції

частинок відносно їх центра мас. Момент інерції залежить від розподілу мас всередині цієї насінини і саме цей розподіл виділяє зріле виповнене зерно серед інших насінин. Тому видається доцільним дослідження можливості розділяти деякі зернові суміші саме за моментом інерції. Останнім часом велика увага надається енергоощадним технологіям, основою яких є гравітація. Як правило, робота гравітаційних сепараторів базується на відмінностях фракцій по шорсткості та пружності але на сьогодні можливість застосування моменту інерції частинок, як ознаки розподілу на цих сепараторах, вивчена не достатньо і потребує подальшого розгляду.

В дослідженнях, які проводились в цьому напрямку це питання, як правило, залишається поза увагою. Наприклад, гравітаційний рух частинки, як матеріальної точки, по гравітаційній поверхні розглянуто академіком П.М. Василенко. В цій роботі вивчалось ковзання частинки при її подачі у поперечному напрямку відносно нахилу поверхні. Співударяння частинки з поверхнею не розглядалось. Роботи [7, 37, 40] присвячені дослідженню періодичних режимів руху кулястої частинки у повітряному потоці між двома площинами. Розглянуто як періодичні симетричні режими – для вертикально розміщених площин [7], так і асиметричні – для похилих площин [37]. Для підтримки вказаних режимів обов'язкове коливання площин. Найбільш близькою за змістом до цієї статті є робота [40]. Вона присвячена дослідженню неперіодичних режимів руху частинки у повітряному потоці між двома площинами, що коливаються. При деяких обмеженнях на параметри системи взаємодія частинки з верхньою площиною припиниться і вона буде рухатися в ударному режимі по нижній площині.

Як бачимо, взаємодія частинок матеріалу з робочою поверхнею гравітаційних сепараторів відбувається за допомогою удару [38,60,63,64]. При великих швидкостях удару, більших, ніж 4 м/с, слід враховувати пластичні деформації, що виникають в зоні контакту [23,60,63]. При цьому ефективною є Пуассонівська модель удару, де враховуються фази стискання та відновлення частинок. Але гравітаційні технології підтримують переважно

режими руху при швидкостях, значно менших 4 м/с. В цьому випадку допустимою є теорія удару, яка основана на відомій гіпотезі Ньютона або уточнена теорія удару Плявнієкса В.Ю. яка застосована в роботі [38], яка прийнята в цій роботі. Розрахунки та графічні ілюстрації виконаємо в середовищі Mathcad [68].

Тому виявлення особливостей ударного руху частинок суміші на основі аналізу траєкторій вказаного руху та обґрунтування можливості використання моменту інерції частинок відносно їх центра мас, як ознаки розподілу сипких матеріалів на фракції є актуальним питанням.

Розглянемо рух окремої частинки сипкого матеріалу по робочій поверхні у вигляді похилої площини (рис. 2.5). Значна частина сипких матеріалів включає частинки кулястої форми. Наприклад, кулясту форму має насіння ріпаку, гороху, проса, маку, капусти та багатьох інших рослин. Отже, приймемо далі, що частинки оброблюваного матеріалу мають кулясту форму. Відмітимо також, що результати досліджень для кулястої форми можуть бути перенесені і на частинки інших форм, якщо треба оцінити процеси руху не кількісно, а лише якісно. Крім того, в гравітаційних сепараторах заради зменшення травмування зерна при співударяннях з робочими поверхнями встановлюються малі швидкості зіткнення. В цих умовах опором повітря при дослідженнях руху частинок доцільно знехтувати.

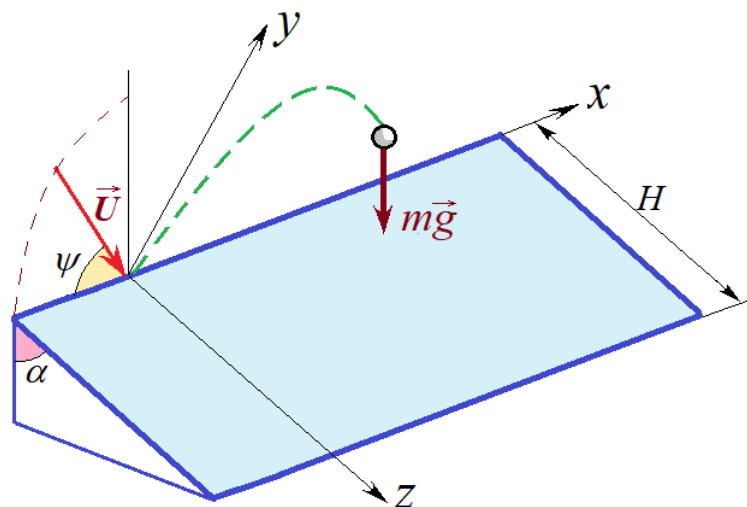


Рисунок 2.5 Схема моделювання руху частинки після удару об похилу площину з подачею в поперечному напрямку

Розрахункова схема руху кульки зображена на рис. 2.5. Нехай α – кут нахилу робочої поверхні; ψ – кут поперечної подачі частинки відносно горизонталі. Забезпечити необхідну швидкість завантаження $\vec{U}$ можна, наприклад, за рахунок скочування частинки з деякої висоти h по прямолінійній напрямній, яка встановлена під тим же кутом ψ відносно горизонталі. Вважаючи, що частинки скочуються по напрямній без проковзування, одержано вирази для лінійної ($\vec{U}$) і кутової ($\vec{\omega}$) швидкостей до удару в проекціях на вісі відносної системи координат xzy :

$$U = \sqrt{2gh}, \quad U_x = U \cos \psi, \quad U_y = -U \sin \psi \sin \alpha; \quad U_z = U \sin \psi \cos \alpha; \quad (2.34)$$

$$\omega = U/r, \quad \omega_x = 0, \quad \omega_y = -\omega \cos \alpha, \quad \omega_z = -\omega \sin \alpha. \quad (2.35)$$

Для знаходження кінематичних параметрів руху частинки після удару застосовувалося рівняння косого удару об перешкоду Плявнієкса В.Ю. Наведемо ці рівняння, модифіковані в роботі [38], для частинок кулястої форми:

$$V_x = U_x - \frac{\mu(U_x + \omega_z r)}{1 + \mu}, \quad V_y = -RU_y, \quad V_z = U_z - \frac{\mu(U_z - \omega_x r)}{1 + \mu}, \quad (2.36)$$

$$\Omega_x = \omega_x + \frac{U_z - \omega_x r}{r(1 + \mu)}, \quad \Omega_y = \omega_y, \quad \Omega_z = \omega_z - \frac{U_x + \omega_z r}{r(1 + \mu)}, \quad (2.37)$$

де: $\vec{U} = (U_x, U_y, U_z)$, $\vec{V} = (V_x, V_y, V_z)$ – швидкість центра мас кульки,

відповідно, до та після удару;

$\vec{\omega} = (\omega_x, \omega_y, \omega_z)$, $\vec{\Omega} = (\Omega_x, \Omega_y, \Omega_z)$ – кутова швидкість руху кульки,

відповідно, до та після удару;

R – коефіцієнт відновлення швидкості при ударі;

$$\mu = (\rho/r)^2;$$

r , ρ – відповідно, радіус кульки і радіус інерції кульки, при цьому

$$0 < \mu < 2/3 \text{ [37]}.$$

Диференціальні рівняння польоту частинки між співударяннями мають вигляд:

$$\ddot{x} = 0; \quad \ddot{y} = -g \sin \alpha; \quad \ddot{z} = g \cos \alpha. \quad (2.38)$$

Розв'язок цих рівнянь при початкових умовах (2.39)

$$x = x_0, \quad y = y_0, \quad z = z_0, \quad \dot{x} = V_{x0}, \quad \dot{y} = V_{y0}, \quad \dot{z} = V_{z0} \quad \text{при} \quad t = t_0 \quad (2.39)$$

одержано у наступному вигляді:

$$\dot{x} = V_{x0}, \quad \dot{y} = V_{y0} - g(t - t_0) \sin \alpha, \quad \dot{z} = V_{z0} + g(t - t_0) \cos \alpha; \quad (2.40)$$

$$\begin{aligned} x &= x_0 + V_{x0}(t - t_0), & y &= y_0 + V_{y0}(t - t_0) - \frac{1}{2}g(t - t_0)^2 \sin \alpha, \\ z &= z_0 + V_{z0}(t - t_0) + \frac{1}{2}g(t - t_0)^2 \cos \alpha. \end{aligned} \quad (2.41)$$

Кінематичні параметри пружної частинки в момент завантаження на площину (до першого зіткнення) визначалися за співвідношеннями (2.34)-(2.35), а початкові умови після відриву від площини – за рівняннями удару (2.36)-(2.37). Далі застосовувався метод припасовування інтервалів, коли кінцеві параметри кожного попереднього інтервалу вважалися початковими параметрами для кожного наступного. Інтервалом вважається політ частинки між двома сусідніми ударами об площину. Параметри польоту визначалися рівняннями (2.40), (2.41). Розрахунок руху частинки продовжувався до моменту оминання нею нижньої кромки робочої поверхні. Цей момент настає, коли координата z при польоті частинки досягає ширини H робочого органу (рис.2.5). Отже, останній інтервал, як правило, є скороченим, а його тривалість знаходиться з останнього із рівнянь (2.41) при умові $z = H$ (з двох коренів приймається додатний):

$$t = t_0 - \frac{V_{z0}}{g \cos \alpha} + \sqrt{\left(\frac{V_{z0}}{g \cos \alpha}\right)^2 + \frac{2(H - z_0)}{g \cos \alpha}}. \quad (2.42)$$

Для побудови просторової траєкторії руху частинки використовувалась влаштована функція Mathcad: $\text{CreateSpace}(F, t_0, t_k, tgrig, fmap)$. В ній: F – трьохелементна векторна функція однієї змінної (t); t_0, t_k – проміжок для змінної t ; $tgrig$ – число точок кривої; $fmap$ – необов'язковий параметр, який вказує на вид координат для побудови графіка (при відсутності параметра

$f_{\text{тар}}$ координати вважаються декартовими). В нашому випадку $F = (x(t) \ y(t) \ z(t))^T$, де “T” – символ транспонування вектора. Результати розрахунків проілюстровані графіками нижче. Для більшої наглядності масштабний коефіцієнт висоти підскоку частинок по осі Oy збільшено до $\kappa = 3$.

Критерієм розподілу сумішей в гравітаційному сепараторі може бути “дальність стрибків” частинок при відбиванні від робочої поверхні або “дальність транспортування” (значення координати x сходу частинок з робочої поверхні – рис.2.5).

На рис. 2.6 (а) зображені траєкторії руху частинок, які відрізняються шорсткістю ($f = 0,1$ – крива червоного кольору, $f = 0,9$ – синього). Як бачимо, коефіцієнт тертя майже не впливає на траєкторію руху частинок.

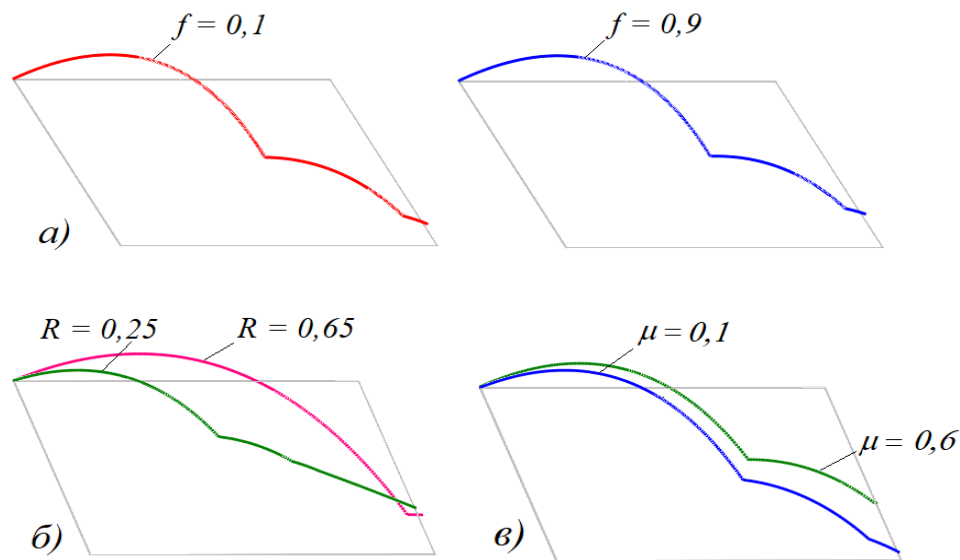


Рисунок 2.6 – Просторове зображення траєкторій руху частинок при: $\alpha = 45^\circ$; $\psi = 60^\circ$; $H = 0,4\text{м}$; а) $R = 0,5$, $\mu = 0,4$; б) $f = 0,4$, $\mu = 0,4$; в) $R = 0,45$, $f = 0,4$

Це означає, що навіть у тому разі якщо коефіцієнти тертя частинок суміші мають великі розбіжності їх сепарація на фрикційних поверхнях з ударом недоцільна і в цьому випадку слід здійснювати пошук іншого способу сепарації, наприклад на віброфрикційних поверхнях або горках з рухомою поверхнею.

На рис. 2.6 (б) – траєкторії руху частинок, які відрізняються пружністю ($R=0,25$ для кривої зеленого кольору, $R=0,65$ – для кривої рожевого кольору). Перший критерій (дальність стрибків) успішно використовується, що не суперечить одержаним кривим. Але за другим критерієм (дальність транспортування) розділити суміші на фракції різної пружності неможливо.

Можна також відзначити, що траєкторії руху частинок у цьому випадку відрізняються по висоті. Це наводить на думку про пошук нових способів сепарації за цією ознакою. Наприклад, на багатоярусних ударних сепараторах частинки, що мають більшу висоту траєкторій, можуть співударятись з верхніми сепаруючими поверхнями, а значить траєкторії частинок пружної фракції будуть іншими.

На рис. 2.6 (в) маємо траєкторії руху частинок в залежності від показника μ , який прямо пропорціональний моменту інерції ($J = m\mu r^2$). Ці траєкторії (синього та зеленого кольору) суттєво відрізняються між собою за дальністю транспортування при майже однаковій дальності стрибків. Це вказує на можливість розподілу сумішей на фракції, частинки яких відрізняються моментом інерції. Більш детально ця особливість показана на рис. 2.7 (червоний колір). З нього випливає, що дальність транспортування лінійно залежить від показника μ на відповідному відрізку $[0,1; 0,6]$. Аналогічна залежність має місце для часу транспортування (синій колір). За вказаною ознакою можлива як сепарація, так і сортування насіння.

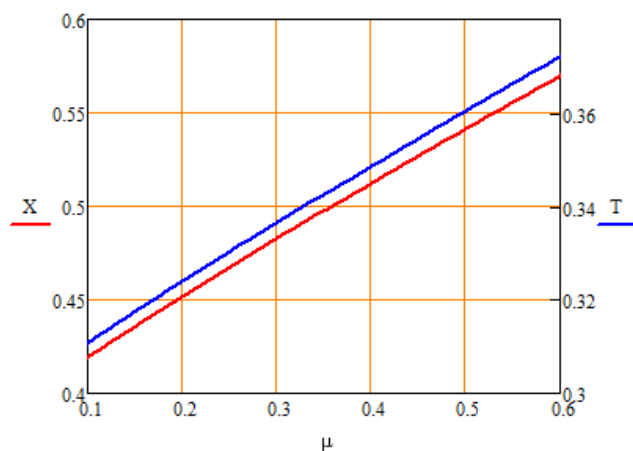


Рисунок 2.7 – Залежності дальності і часу транспортування частинок вздовж осі Ox від показника μ при: $h_0 = 0,3\text{ м}$; $H = 0,4\text{ м}$; $r = 0,006\text{ м}$;
 $\alpha = 60^\circ$; $\psi = 45^\circ$; $f = 0,6$; $R = 0,5$.

Таким чином проведені теоретичні дослідження руху частинок кулястої форми по гравітаційній поверхні показали доцільність проведення розрахунків і побудови просторових траєкторій руху частинок у середовищі Mathcad. Також з'ясовано, що дальність транспортування фракцій сипкої суміші, які відрізняються між собою пружністю або шорсткістю практично однакова, тому сепарація сумішей за цим критерієм недоцільна. Поряд з цим, частинки суміші з більшою пружністю мають в процесі руху більшу дальність стрибків, що вже успішно використовується, але різниця у висоті підскоку частинок різної пружності, як критерій розподілу, практично не реалізується. На нашу думку цей критерій може бути корисним для багатоярусних гравітаційних сепараторів, де пружні частинки можуть взаємодіяти з верхніми робочими органами, в результаті чого їх траєкторія буде вигідно відрізнятися порівняно з траєкторіями інших частинок. Момент інерції частинок відносно їх центра мас, як критерій розподілу, до цього часу вивчений не достатньо. Як відомо, він залежить від розподілу мас всередині цієї насінини і саме цей розподіл виділяє зріле виповнене зерно серед інших насінин. Виконані теоретичні дослідження показали, що траєкторії руху частинок з різними моментами інерції мають достатньо різну дальність транспортування. Це свідчить про доцільність розподілу сипких сумішей на гравітаційних сепараторах за цим критерієм, а також сепараторах інших конструкціях які доцільно розробити для сепарації сипких сумішей за цим критерієм.

Висновки за розділом 2

1. У результаті проведених досліджень встановлено, що при ударній взаємодії кулеподібної частинки з нахиленою поверхнею обертання частинки припиняється протягом першої фази удару і відбивання відбувається звичайним чином та в межах реальних значень частот обертання частинки

при падінні на нахилenu площину, коефіцієнтів тертя і кутів нахилу площини, що відбиває, обертання частинки не надає істотного впливу на відбивання (відскок) частинки від площини, і їм можна знехтувати.

2. Встановлено, що врахування позиційного тертя суттєво впливає на розраховані параметри удару. Воно зменшує максимум зближення центрів мас тіл і збільшує максимум сили удару та тривалість динамічної взаємодії. Названі параметри також суттєво залежать від форми граничних поверхонь тіл в області їх контакту.

3. Внесені зміни в постановку задачі дисипативного удару, внаслідок чого коефіцієнт відновлення швидкості віднесено до вхідних даних, які задають для проведення розрахунку. При цьому має враховуватись залежність коефіцієнта відновлення від початкової швидкості удару.

4. Встановлена можливість сепарація частинок на похилій площині в поперечному напрямку з ударом об площину за рахунок використання різниці у висоті траєкторії їхнього руху та в залежності від моменту інерції частинок.

РОЗДІЛ 3

ПРОГРАМА І МЕТОДИКА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

Експериментальні дослідження спрямовані на отримання даних, які необхідні для математичного моделювання процесів очищення насіння проса від важковідокремлюваного насіння курячого проса та щетинника сизого на гравітаційних багатоярусному ударному та ударному з поперечною подачею сепараторах, перевірку адекватності результатів теоретичних досліджень руху насіння по робочим органам дослідним даним, визначення конструкторсько-технологічних параметрів та оптимальних режимів роботи розроблених сепараторів, підтвердження ефективності роботи сепараторів при очищенні насіння проса.

3.1. Програма експериментальних досліджень

Відповідно до поставлених задач складена програма експериментальних досліджень включала:

- Визначення основних фізико-механічних властивостей насіння проса та важковідокремлюваних бур'янів курячого проса та щетинника сизого (геометричних розмірів, статичних та динамічних коефіцієнтів тертя, відновлення швидкості під час удару, граничних кутів підйому та траєкторій руху по вібраційній неперфорованій поверхні, маси 1000 зернин).

- Обґрунтування ознаки подільності насіннєвої суміші проса від важковідокремлюваних бур'янів та визначення можливості відбору у відходи неповноцінного насіння проса. – Проведення планування багатофакторного експерименту та на основі його реалізації визначення впливу регулюємих параметрів сепараторів на якість очищених фракцій.

- Обґрунтування основних параметрів і режимів роботи сепараторів на підставі аналізу результатів отриманих експериментальних даних.

– Проведення порівняльних випробувань дослідних зразків сепараторів при очищенні насіння проса від важковідокремлюваного насіння бур'янів.

При виконанні програми досліджень вирішувались додаткові питання:

- Вибір стандартного обладнання для проведення експериментів
- Розробка та впровадження спеціального обладнання та пристроїв для лабораторних досліджень

3.2. Методика визначення фізико-механічних властивостей насіння проса та важковідокремлюваних бур'янів

Для проведення досліджень використовувався насіннєвий матеріал проса сорту «Харківське – 31», вологістю 13-14%, що пройшов попереднє очищення на пневмо-решітно-трісрних робочих органах та насіння важковідокремлюваних бур'янів курячого проса та щетинника сизого.

При вивченні фізико-механічних властивостей насіння проса та бур'янів окремо для кожного зерна визначали: коефіцієнти тертя, граничні кути підйому по вібраційній фрикційній поверхні, коефіцієнти відновлення швидкості при ударі.

Для визначення фізико-механічних властивостей використовували насіння проса сорту «Харківське – 31» вологістю 13-14%, що пройшли попередню обробку, сушку та основну обробку та насіння важковідокремлюваних супутніх бур'янів щетинника сизого та курячого проса. Дослідження проводились на основі вибіркового методу вибірками по 1000 шт. зерен у відповідності з ДСТУ 4138-2002. [34].

Програма досліджень проводиться з метою підтвердження аналітичних досліджень процесу сепарації насіння проса на гравітаційному багатоярусному сепараторі, перевірки результатів математичної моделі і визначення раціональних режимів роботи сепаратора. При складанні програми досліджень використовувалися результати аналізу сепараторів

різних конструкцій, і рекомендації по їх роботі [1-4,13-24,46-55,69,71,73,79,82, 85-88,91-95,110,11,129-144],а також аналіз конструкції приладів і механізмів для дослідження фізико-механічних властивостей насіння проса та інших культур та важковідокремлюваного насіння бур'янів [5,12,56,57,72,80,113,].

Програма досліджень передбачає проведення лабораторних дослідів і виробничих випробувань і включає в себе:

- вивчення фізико-механічних властивостей насіння проса та важковідокремлюваних бур'янів;
- обґрунтування моделі гравітаційного багатоярусного ударного сепаратора;
- обґрунтування моделі гравітаційного ударного сепаратора з поперечною подачею;
- проектування, розробка і виготовлення дослідних зразків обладнання для проведення експериментальних досліджень (гравітаційний багатоярусний ударний сепаратор, гравітаційний ударний сепаратор з поперечною подачею, прилади для визначення статичного та динамічного коефіцієнтів зовнішнього тертя, живильник);
- проведення експериментальних досліджень;
- обробка експериментальних даних і отримання рівнянь регресії;
- визначення конструктивних і режимних параметрів гравітаційного багатоярусного ударного сепаратора та гравітаційного ударного сепаратора з поперечною подачею;
- випробування нових технологій очищення насіння проса від насіння важковідокремлюваних бур'янів;
- виробничі випробування та техніко-економічна оцінка роботи гравітаційного багатоярусного ударного сепаратора.

Експериментальні дослідження проводилися в лабораторних умовах і в фермерському господарстві СФГ «Калина» Вовчанського р-н, Харківської обл. та Полтавського р-ну Полтавської області. Використовувалися

загальноприйняті і приватні методики з визначення фізико-механічних властивостей зерна, якісних і енергетичних показників процесів, планування багатофакторних експериментів які забезпечують необхідну точність, достовірність, відтворюваність і адекватність результатів.

Основними показниками процесу сепарації насіння проса були показники, які визначені у попередніх експериментах: кути нахилу робочих поверхонь, продуктивність, кут нахилу живильного лотка і відсоток виходу повноцінного продукту.

Перед початком експериментів встановлювали значення факторів згідно матриці експерименту. При сталому режимі роботи сепаратора здійснювали збір продуктів сепарації, фіксували час проведення досліду та зважування кожної фракції.

Продуктивність Q (кг/год.) визначали за формулою:

$$Q = \frac{0,36 \cdot M}{T},$$

де: M – маса кожної наважки, гр.;

T – тривалість сепарації.

Методи математичної обробки експериментальних даних при проведенні експериментів були реалізовані за допомогою ноутбука ASUS-756 та комп'ютерних програм:

– Microsoft Excel 2007 – для розрахунку коефіцієнтів регресії величини достовірності апроксимації;

– Компас 3D, V16 – для обчислення параметра оптимізації та побудови ліній рівних рівнів.

У процесі дослідження вимірювалися і визначалися наступні величини:

– тривалість експерименту;

– маса матеріалу, що сепарується за час дослідів;

– число обертів ротора;

– живильника встановленого з метою підвищення рівномірності подачі матеріалу на робочі поверхні сепаратора, який був встановлений тільки для проведення лабораторних досліджень.

Дослідження проводилися за стандартними і приватними методиками. Технічні характеристики та клас точності приладів використаних при проведенні експериментальних досліджень представлені в табл. 3.1.

Таблиця 3.1 – Вимірювальні прилади, реєструюча і регулююча апаратура, застосовувані при проведенні експериментів

№	Найменування	Марка	Кл. точності	Межа вимірювання	Призначення
1	Частотний перетворювач	Веспер E2-8300		До 400 Гц до 1,5 кВт	Зміна частоти обертання робочого органу і вимірювання потужності двигуна
2	Ноутбук	Asus-756			Обробка цифрової інформації
3	Ваги лабораторні	ВК-600	0,01	До 600г.	Визначення маси проб і залишку на ситах
4	Секундомір механічний	СОПпр-2а-3	Похибка за 30 хв., $\pm 1,6$	0,2с.	Реєстрація тимчасових інтервалів
5	Вологомір	ЭВ-2К	2	2-20%	Вимірювання вологості зерна
6	Тахометр безконтактний Benetech GM8905	AR926	0,5	От 2,5 до 99 999 мин^{-1}	Вимірювання частоти обертання валу електродвигуна
7	Штангенциркуль	ШЦЦ-1	2	0,01мм	Вимірювання розмірів насіння

Результати вимірювань представлені в додатках А.

3.2.1. Дослідження коефіцієнтів тертя

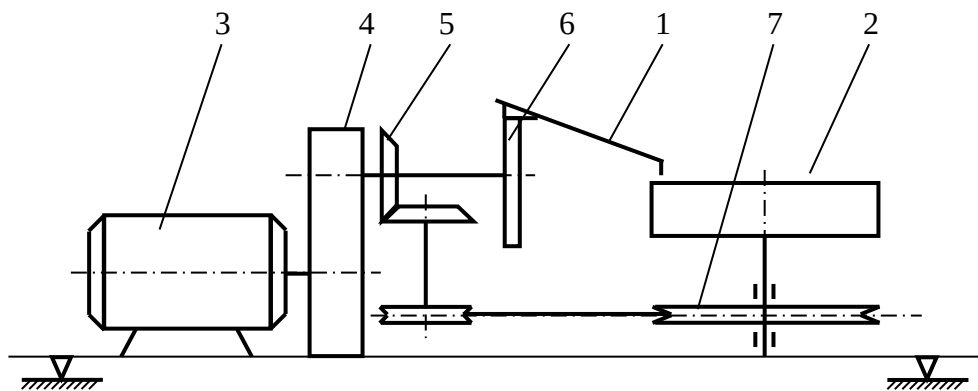
Коефіцієнти тертя характеризують фрикційні властивості насіння і залежать в основному від стану поверхні насіння, а також виду фрикційного матеріалу поверхні що сепарує.

Визначення коефіцієнтів тертя необхідне для з'ясування можливості розділення насіння за властивостями поверхні, а також для вибору

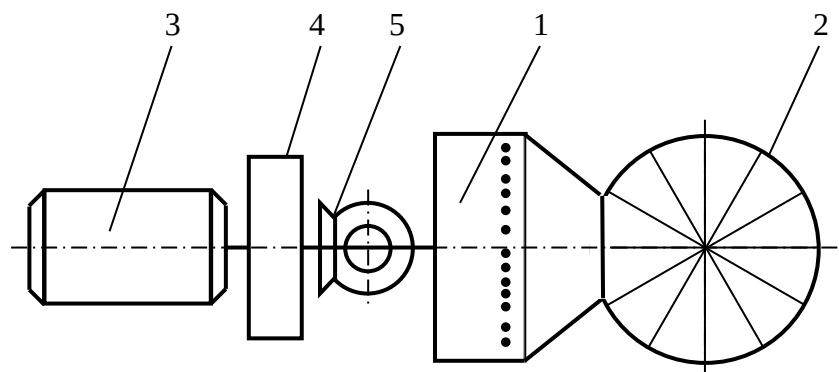
параметрів і режимів роботи гравітаційного багатоярусного сепаратора.

Нижче розглянемо недоліки визначення коефіцієнтів тертя та запропонуємо прилади для їх визначення. Широко відомий принцип визначення статичного коефіцієнту тертя за допомогою похилої площини, в якому через визначення кута нахилу площини, під яким починається рух частинок по похилій площині за допомогою формули $f = \operatorname{tg} \varphi$, яка свідчить про те, що коефіцієнт тертя дорівнює тангенсу кута нахилу похилої площини, при якому починається рух частинки. Недоліком цього способу є те, що коефіцієнт тертя кожної з частинок одного й того ж виду сировини має відмінності, тому для визначення середньостатичної величини коефіцієнта тертя сипкої сировини, або для побудови варіаційних кривих потрібно визначити коефіцієнт тертя для великої кількості частинок, як правило до 300-1000шт. Причому кожного разу визначення кута нахилу похилої площини потрібно починати з мінімального, при якому частинка знаходиться в спокої, поступово підвищувати його, поки вона не почне рухатись. Отже, на це витрачається велика кількість часу, тобто, недоліком цього способу є дуже низька продуктивність. Частково цей недолік усунуто в приладі для визначення статичного коефіцієнта зовнішнього тертя, запропонованого П.М. Заїкою та Г. Е. Мазневим. У цьому приладі похила площина поділена на похилі ділянки вкриті різним фрикційним матеріалом по якому визначається величини коефіцієнта тертя. Принцип визначення коефіцієнтів тертя є таким, як описано вище, але за рахунок того, що похила площина має декілька похилих ділянок, час визначення коефіцієнтів тертя можна дещо скоротити. Але основним недоліком цього приладу є теж низька продуктивність, яка пояснюється ще тим, що на кожен подовжню ділянку похилої площини кладуть лише одну частинку. Нами розроблено прилад [72] в якому задача підвищення продуктивності вирішується тим, що прилад для визначення коефіцієнтів тертя сипких матеріалів, що містить поверхню тертя, виконану з можливістю зміни кута нахилу та приймачі продукту, в якому, приймачі продукту виконані у вигляді барабана з радикальними

секціями та встановлені з можливістю їх обертання навколо осі барабана, причому кулачковий механізм підйому поверхні тертя кінематично зв'язаний з механізмом обертання барабана, через зубчасту та ланцюгову передачі. Прилад складається (рис. 3.1) з похилої площини 1, приймачів продукту 2, які виконані у вигляді барабана, електродвигуна 3, редуктора 4, конічної передачі 5, кулачка 6, ланцюгової передачі 7, що зв'язує механізм підйому поверхні тертя з механізмом обертання барабана.



а)



б)

а – вигляд збоку; б – вигляд зверху; 1 – похила площина; 2 – приймачів продуктів; 3 – привод; 4 – редуктор; 5 – конічна передача; 6 – кулачок; 7 – ланцюгова передача

Рисунок 3.1 – Схема приладу для визначення статичного коефіцієнту зовнішнього тертя

На рис.3.2. представлено зовнішній вигляд приладу для визначення статичного коефіцієнту зовнішнього тертя.



Рисунок 3.2 – Загальний вигляд приладу для визначення коефіцієнтів тертя

Працює прилад для визначення коефіцієнтів тертя наступним чином. На похилу площину приладу укладається повна наважка сировини, для якої визначається кут тертя, наприклад насіння. Похила площина встановлюється на мінімальний кут, при якому частинки ще залишаються в спокої на похилій площині.

Включається привод підйому площини та обертання барабана. При збільшенні кута нахилу, частинки які мають менший коефіцієнт тертя починають рух вниз по площині і падають в першу секцію приймачів барабана.

Як правило, при цьому механізм підйому площини підіймається на один градус, але це величина може бути й іншою, наприклад $1,5^{\circ}$ або 2° .

При подальшому підйомі похилої площини насіння потрапляє в другу секцію приймачів барабана і так далі. Після підйому площини до величини, коли всі частинки перемістяться в секції приймачів, підраховується їх кількість в кожній секції та підраховується середньоарифметична величина коефіцієнта тертя, або вибудовуються варіаційні ряди або криві цієї величини.

Цей процес на відміну від відомих здійснюється в результаті проведення навіть одного експерименту, якщо на похилій площині буде

укладена достатня кількість частинок сипкого матеріалу (як правило до 300 шт.) за рахунок цього продуктивність визначення коефіцієнтів тертя сипких сумішей значно зростає.

Під час безпосереднього контакту фізичних тіл виникають сили тертя, характерною рисою яких є перешкоджання руху тіл відносно одне одного або перешкоджання самому виникненню такого руху. Сила, яка виникає в той час коли одне тіло ще не ковзає відносно іншого є силою тертя спокою. Сила тертя дорівнює по модулю і протилежна за напрямком тієї зовнішньої сили, яка намагається викликати ковзання одного тіла відносно другого. Зазвичай, коли мова йде про силу тертя спокою, мають на увазі найбільше значення цієї сили.

Силу тертя спокою визначають за відомою формулою:

$$F = f \cdot N, \quad (3.1)$$

де: f – постійна величина, яка дорівнює відношенню сили тертя F між даними поверхнями до сили N , з якою тіла притискаються одне до одного.

Постійну f називають коефіцієнтом тертя спокою:

$$f = \frac{F}{N}. \quad (3.2)$$

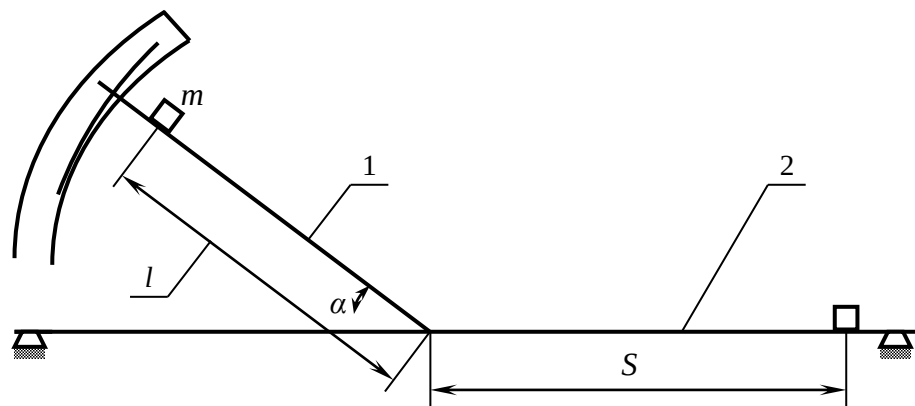
Для тіл з достатньою масою, таких що можна виміряти силу тертя за допомогою, наприклад динамометра, коефіцієнт тертя спокою визначають за цією формулою. Якщо ж сила, яка прикладена до тіла підтримує рівномірне ковзання, то вона менша від сили, яка необхідна для того щоби зрушити тіло з місця. За аналогією з коефіцієнтом тертя спокою, введено поняття коефіцієнта тертя ковзання, або динамічного коефіцієнта тертя він зрозуміло трохи менший за коефіцієнт тертя спокою. Визначають його за тією ж формулою (3.1), де сила F є сила тертя ковзання.

І в першому і в другому випадках силу тертя вимірюють, як правило для знаходження коефіцієнтів тертя. Вимірювання сили тертя ковзання пов'язане з певними складнощами. І в той же час вимірювання коефіцієнта тертя ковзання є корисним в багатьох випадках, наприклад при сепарації зерна, проектуванні зерносклади, складів на елеваторах, цукрозаводах,

борошномельних та інших переробних підприємствах.

Однак, за допомогою вищеписаних приладів визначити кути та коефіцієнти тертя ковзання неможливо. Академіком Желіговським В.А. запропоновано простий прилад для визначення кутів та коефіцієнтів тертя ковзання, в якому визначається кут тертя масиву частинок, які або склеєні між собою, або наліплені на липку поверхню, що не дозволяє визначити кути тертя для поодиноких частинок і це є його основним недоліком. Для визначення кутів та коефіцієнтів тертя ковзання поодиноких частинок розроблені також прилади, що мають доволі складну конструкцію, наприклад, прилади у яких робочою поверхнею є бескінечна стрічка. Якість визначення кутів та коефіцієнтів тертя ковзання на цих приладах низька, зв'язку з вимушеними мікроколиваннями рухомої поверхні приладу.

Для визначення коефіцієнта тертя ковзання частинок (насінин), що не перекидаються, нами пропонується простий прилад, який використовує похилу і горизонтальну площину. Схема такого приладу показана на рис.3.3.



1 – похила площина; 2 – горизонтальна площина

Рисунок 3.3 – Схема приладу для визначення коефіцієнтів тертя ковзання

Ідея принципу роботи приладу полягає в наступному. З нахиленої площини 1 довжиною l і з кутом нахилу α зісковзує частинка з масою m , після чого проходить відстань S по горизонтальній площині 2.

Коефіцієнт тертя по поверхні дорівнює f . Частинка, що знаходиться на висоті $l \sin \alpha$, має потенційну енергію $mgl \sin \alpha$, що переходить по мірі зісковзування частинки в кінетичну енергію і роботу прости сил тертя.



Рисунок 3.4 – Загальний вигляд приладу для визначення коефіцієнтів тертя ковзання

В основі нахиленої площини:

$$mgl \sin \alpha = \frac{mV^2}{2} + F_{\text{тр}} l, \quad (3.3)$$

де: $F_{\text{тр}}$ – сила тертя.

Так як $F_{\text{тр}} = fmg \cos \alpha$, то кінетична енергія частинки:

$$W_k = \frac{mV^2}{2} = mgl(\sin \alpha - f \cos \alpha). \quad (3.4)$$

$$\text{Швидкість при цьому: } V = \sqrt{2gl(\sin \alpha - f \cos \alpha)}. \quad (3.5)$$

Пройдена по горизонталі відстань S визначається роботою проти сил тертя, тобто:

$$W = fmgS,$$

$$\text{але } S = \frac{W_k}{fmg} = \frac{l}{f}(\sin \alpha - f \cos \alpha). \quad (3.6)$$

З (3.6) отримаємо:

$$f = l \frac{\sin \alpha}{S + l \cos \alpha}. \quad (3.7)$$

Таким чином, знаючи пройдену по горизонталі відстань, за формулою (3.7) можна визначити значення коефіцієнту тертя.

3.2.2. Дослідження коефіцієнтів відновлення швидкості під час удару

Коефіцієнт відновлення швидкості характеризує пружні властивості матеріалу. Якщо мова йде про коефіцієнт відновлення швидкості, наприклад, насіння під час удару об пружну нерухому поверхню сепаратора при сепарації зерна, то відповідно до прийнятої найбільш загальної аналітичної моделі удару насіння об площину, нормальний ударний імпульс і відповідна зміна швидкості руху насіння в напрямку нормалі до площини визначається коефіцієнтом відновлення K . Коефіцієнт відновлення для насіння, як правило, варіює в широких межах і визначається зазвичай дослідним шляхом. За загальним принципом методики лабораторного визначення коефіцієнта K визначається висота h підскоку насіння після удару з певної висоти H його падіння на горизонтальну площину і оскільки в цьому випадку має місце прямий удар, нормальні складові швидкостей V_{n2} і V_{n1} змінюються абсолютними значеннями:

$$K = \frac{V_2}{V_1}, \quad (3.8)$$

де: V_2 – швидкість насіння після удару, м/с

V_1 – швидкість насіння до удару, м/с

Зазвичай при невеликих висотах падіння до $H < 0,6\text{ м}$ з відомої формули Галілея знаходять:

$$K = \sqrt{\frac{h}{H}}, \quad (3.9)$$

де: h – висота підскоку насіння після удару;

H – висота падіння насіння, м.

Для визначення коефіцієнта K нами використовувався сконструйований прилад зображений на рис. 3.5.

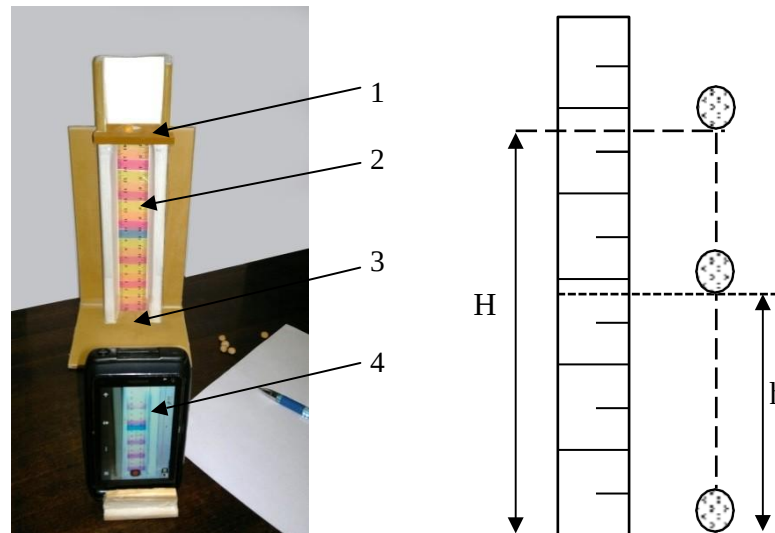
Прилад для визначення коефіцієнта відновлення швидкості має висоту 0,30 м і складається з наступних конструктивних елементів: верхньої плити 1 з отвором, нижньої плити 3, віддаленої від верхньої на відстані 20 см, мірної

лінійки 2 зі шкалою для вимірювання довжини відскоку насіння і відеокамери 4. Нижня частина приладу виконана з можливістю зміни плити 3. Для вивчення пружності зерна при ударі об метал, дерево, скло тощо використовують плити, виконані з відповідного матеріалу.

У приладі використовувалася відеокамера Nikon D5200 18-105 VR Kit із частотою зйомки 60 кадр/с та витримкою 1/250 с.

Досліджувані насіння подавалися по одному в отвір 1. Падаючи, вони ударилися об змінну плиту 3 і підскакували вгору. Одночасно з цим процес руху насіння знімався відеокамерою 4.

Висота відскоку замірялася за допомогою аналізу уповільненого кадру отриманого відеозапису зображення зерна на шкалі мірної лінійки 2.



1 – верхня плита; 2 – мірна лінійка; 3 – нижня змінна плита; 4 – відеокамера
Рисунок 3.5 – Прилад для дослідження пружності зерен проса

Після цього коефіцієнт відновлення кожного насіння підраховували за вищеприведеною формулою (3.9).

На цьому ж приладі визначалась і дальність відскоку насіння, як похідна коефіцієнта відновлення швидкості. У цьому випадку відбивна поверхня встановлювалась під кутом $22,5^{\circ}$ рекомендованим П.М. Заїкою, а для визначення дальності відскоку шкалу вимірювання розташовували горизонтально.

3.2.3. Дослідження ваги 1000 насінин

Вага тисячі насіння визначалася за допомогою лабораторних електронних вагів ТВЕ-0,6 (рис. 3.6), призначених для визначення маси об'єкта зважування в лабораторіях, ювелірних магазинах, ломбардах, у промисловості, сільському господарстві, медицині, науково-дослідних установах.



Рисунок 3.6 – Ваги лабораторні електронні ТВЕ-0,6

Переваги вагів: зручність використання; наявність всіх необхідних функцій; зважування у грамах та каратах; рідкокристалічний (LCD) дисплей з підсвічуванням; невеликий час стабілізації показань – 3 секунди; наявність вбудованого акумулятора.

Технічна інформація та функції ваг: зважування у грамах або каратах; компенсація маси тари; перерахунок штук однакових деталей; автоматичне тестування та обнулення; автоматичне вимкнення дисплея відповідно до заданого часу; контроль $\pm$ щодо встановленої маси зразка; зовнішнє калібрування; вбудований акумулятор RS 232, що дозволяє підключати ваги до принтера чи комп'ютера; дискретність – 0,01 г; нижня межа зважування – 0,5 г; верхня межа зважування – 600 г; зовнішній діаметр платформи – 120 мм; Клас точності за ДСТУ EN 45501/ ГОСТ24104-88: II/4.

При визначенні ваги 1000 насінин з виділеної маси насіння проса послідовно (не перебираючи) відраховуються три навішування по 1000 насінин. Кожна окремо зважується.

За отриманими даними визначається середнє значення маси тисячі насіння $M1000$, за відомою формулою:

$$M1000 = (M11000 + M21000 + M31000 + \dots + Mn1000) / n, \quad (3.10)$$

де: $M11000$; $M21000$; $M31000$; $Mn1000$ – маса тисячі насіння першої, другої, третьої, n -ної навіски, g ;

n – кількість навісок.

3.2.4. Дослідження розмірних характеристик насіння

У теоретичних дослідженнях форма насіння проса апроксимувалась сферою. Насправді ж насіння проса має форму, яка не є точною сферою. У

загальному випадку геометрична форма насіння характеризуватиметься трьома загальноприйнятими розмірами a , b , c . (товщина, ширина, довжина).

Очевидно, що для насіння проса ці розміри будуть досить близькими. При відомих значеннях зазначених розмірів зерна діаметр сфери для його апроксимації визначається як середнє геометричне цих трьох розмірів

$$(d_3 = \sqrt[3]{abc}).$$

Для вимірювання величин a , b , c та отримання розрахункового діаметра насіння використовувався мікроскоп МБС-9 (рис. 3.7). Мікроскоп МБС-9 призначений для спостереження як об'ємних предметів, так і тонких плівкових та прозорих об'єктів, а також препарувальних робіт.

Спостереження може проводитися як при штучному, так і при природному освітленні у відбитому світлі, що проходить. Область застосування мікроскопа МБС-9: ботаніка, біологія, медицина, мінералогія, археологія, машинобудування, приладобудування та ін. галузі науки та техніки.



Рисунок 3.7 – Мікроскоп стереоскопічний МБС-9

Технічні характеристики

Кратність збільшення – 3,33–100. Лінійне поле зору – 393-24 мм. Робоча відстань мікроскопа, мм – 64,4. Джерело світла – лампа 8В, 20Вт. Живлення джерела світла здійснюється через понижувальний трансформатор від мережі змінного струму напругою 220, частотою 50 гц. Габарити приладу в робочому положенні (без підлокітників та освітлювача), мм не більше: 230x190x420. Маса приладу трохи більше 7кг.

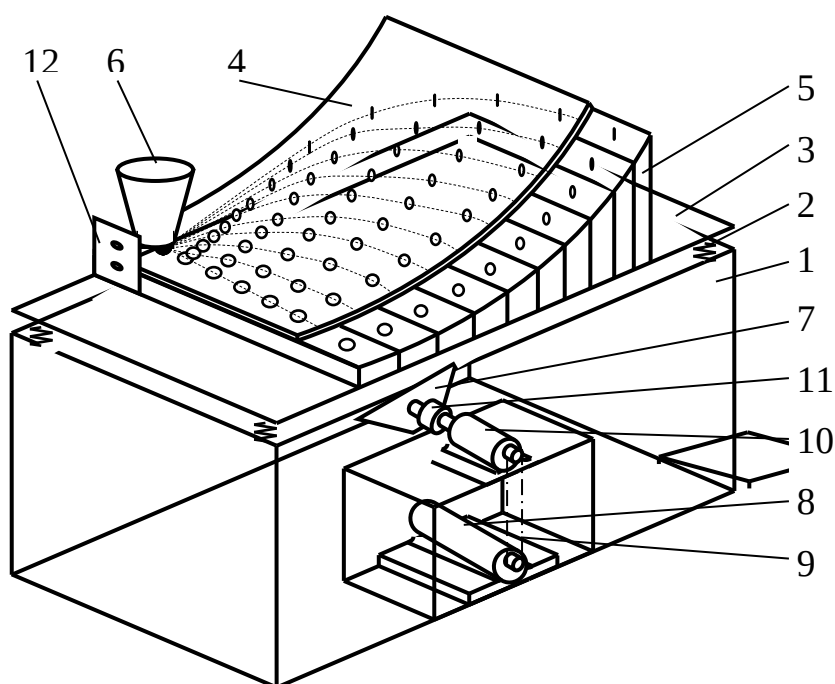
З однієї позиції зернятка на предметному столику мікроскопа (рис.3.7) визначалися два розміри – а та b. Для визначення третього (вертикального) розміру – с зернятко повертали на 90 навколо горизонтальної осі та перед вимірюванням позиціонували за допомогою клейкої стрічки.

3.2.5. Дослідження граничних кутів підйому насіння по похилій фрикційній вібраційній площині

Граничним кутом підйому насіння по вібруючий похилій фрикційній площині називається кут, при якому середня швидкість руху насіння

дорівнює нулю. Він є основною ознакою подільності насіння на вібраційних насінсочисних машинах. [41].

При проведенні досліджень граничні кути підйому насіння проса, і їх важковідокремлюваних домішок будемо визначати експериментальним шляхом на розробленому пристрої представленому на рис. 3.8.



- 1 – рама; 2 – пружини; 3 – вібростіл; 4 – вигнута неперфорована поверхня;
 5 – приймачі продуктів; 6 – живильник; 7 – вібробуджувач;
 8 – електродвигун; 9 – клинопасова передача; 10 – проміжна передача;
 11 – пружня муфта; 12 – механізм регулювання поперечного кута нахилу
 вигнутої неперфорованої поверхні.

Рисунок 3.8 – Пристрій для визначення граничних кутів підйому

Працює розроблений пристрій наступним чином. В живильник поміщається повна дослідна наважка частинок, для насіння більшості сільськогосподарських культур не менше 300 шт. Пристрій включається в роботу. Частинки, які з живильника поступають на вібраційну неперфоровану поверхню під дією вібрації транспортуються угору по вигнутій поверхні, а під дією складової сили тяжіння вниз в поперечному напрямку. В залежності від сукупності фізико-механічних властивостей,

коефіцієнтів тертя, форми та пружних властивостей, угору, на більш високі граничні кути транспортуються шерохуваті, плоскі, непружні частинки та поступово зміщуються в поперечному напрямку і потрапляють у верхні приймачі продуктів. Пружні, круглі, гладкі частинки практично одразу скочуються в поперечному напрямку в приймачі розташовані в нижній частині пристрою. Частинки з проміжними властивостями потрапляють у приймачі розташовані в середній частині.

Далі підраховується кількість частинок, що потрапили в кожний приймач, і всього за один дослід визначається середньоарифметичне значення граничного кута підйому для даних частинок, вибудовуються варіаційні криві або розраховуються інші параметри. Такий же дослід проводять і для іншого фрикційного матеріалу замінивши його на вигнутій неперфорованій поверхні.

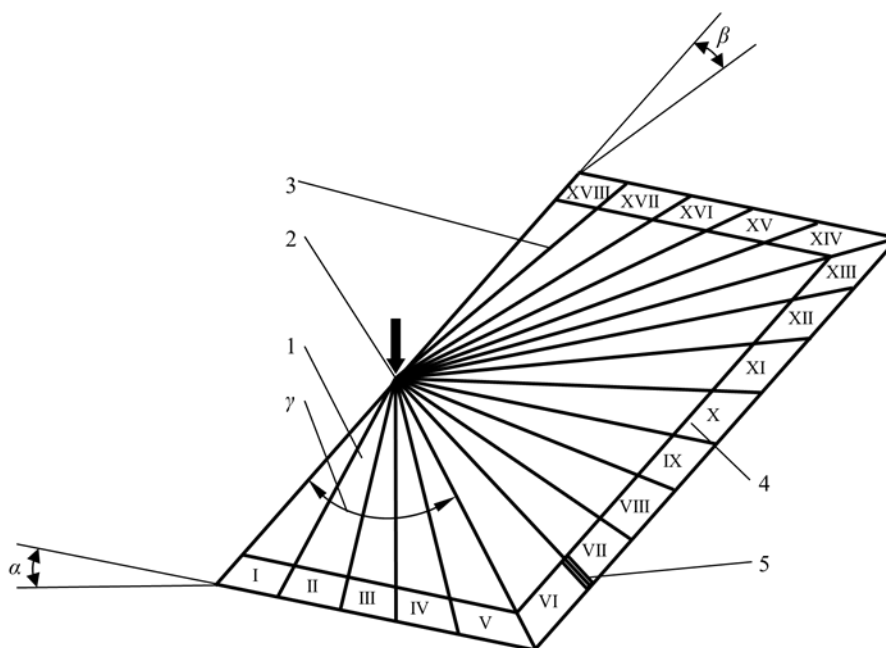
Тобто процедура визначення граничних кутів підйому по неперфорованим вібраційним поверхням на розробленому пристрої, значно спрощується, в десятки разів зменшується час проведення дослідів і підвищується продуктивність.

3.2.6. Дослідження траєкторій руху частинок по вібраційній фрикційній поверхні

При сепарації сумішей на вібраційних сепараторах з повздовжно-поперечним нахилом робочого органа частки суміші, залежно від фізико-механічних властивостей, переміщуються за різними траєкторіями. Тому запропоновано, як ознаку подільності для вібраційного сепаратора з поперечним нахилом фрикційної поверхні прийняти «кут γ нахилу траєкторій» часток суміші до повздовжньої осі сепаратора, що рахується від спадаючої щодо живильника повздовжньої сторони робочої поверхні [20].

На рис. 3.9 схематично представлений новий пристрій для визначення

кутів нахилу траєкторій часток суміші, в якому на відміну від існуючих всі частинки, що рухаються по вібраційній поверхні в різних напрямках знаходяться в рівних умовах, тому що їх шляху від місця завантаження до потрапляння в приймачі продуктів ніщо не заважає, тому що ділильна планка, що ділить суміш на очищену фракцію і відхід встановлена між приймачами продуктів.



1 – плита; 2 – місце подачі часток; 3 – градуйована шкала; 4 – приймачі;
5 – ділильна планка

Рисунок 3.9 – Схема пристрою для визначення кута нахилу траєкторій руху часток по вібраційній фрикційній поверхні

Пристрій складається з плити 1 з фрикційною неперфорованою поверхнею, на якій відмічено місце 2 подачі часток та градуйована шкала 3, а також приймачі насіння 4. У пристрої може також встановлюватися ділильна планка 5. Пристрій працює в такий спосіб. На робочу поверхню плити 1 подають вихідну вибірку насіння, направляючи її в місце подачі часток. Деці передаються вібраційні коливання за допомогою віброзбуджувача. Дека нахилена до горизонту під заданими кутами α_2 й β_2 . Приймачі 4 насіння встановлюють по периметру плити 1 так, щоб вони розташовувалися оппозитно точці 2 місця подачі часток між двома сусідніми лініями градуйованої шкали 3.

Зручно для побудови варіаційних кривих приймачі розміщати через кожні 10...15°.

Після пропуску всієї вибірки виконується підрахунок кількості насіння кожного компонента вихідної суміші, що потрапило в кожний із приймачів 4. За цими даними будують варіаційні криві траєкторій руху частинок різних компонентів досліджуваної суміші. За допомогою варіаційних кривих кутів нахилу траєкторій насіння основної культури та засмічувача визначається кут γ установки ділильної планки 5 сепаратора, при якому суміш розділяється на очищену фракцію та відхід.

3.3. Лабораторні установки та пристрої

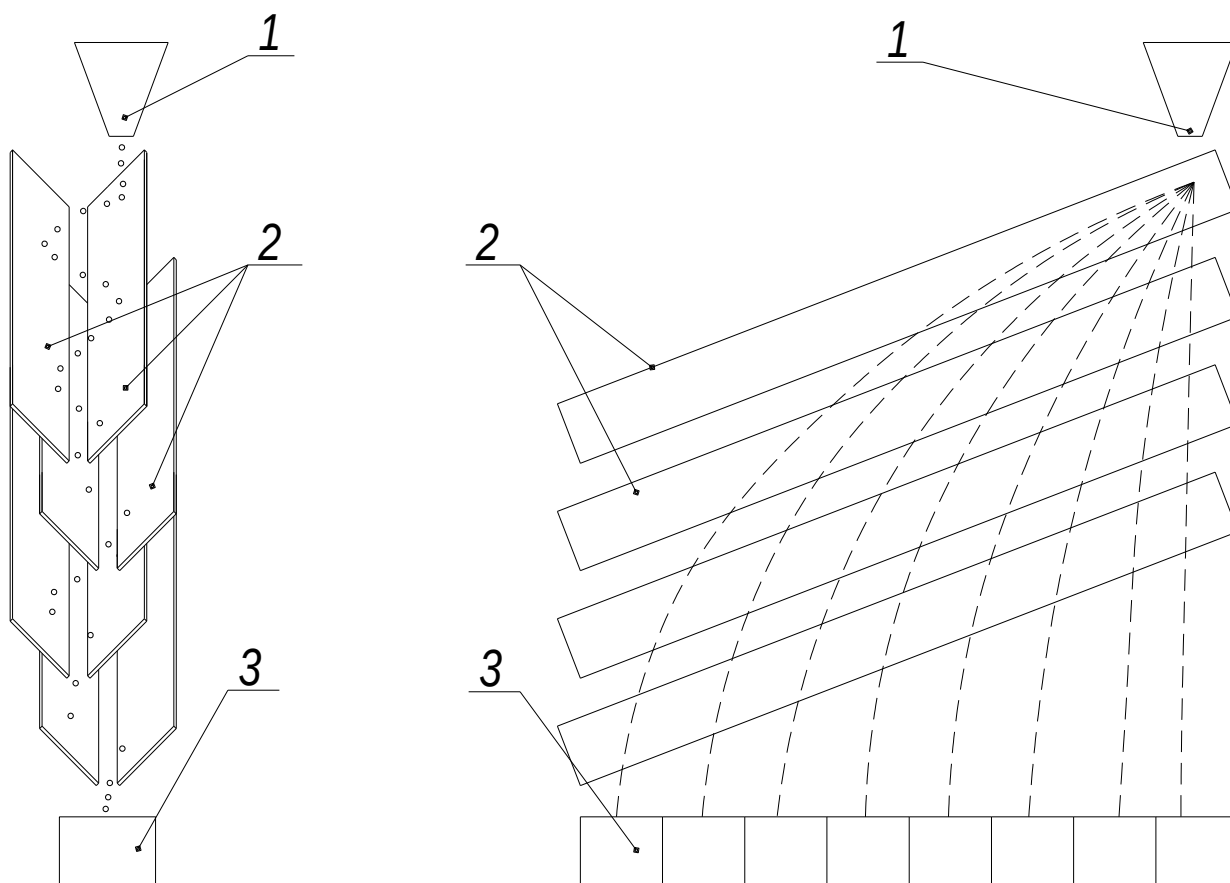
Для проведення експериментальних досліджень процесів сепарації насіння проса були спроектовані та виготовлені лабораторні установки:

3.3.1. Лабораторний гравітаційний багатоярусний ударний сепаратор

Робочим органом сепаратора з урахуванням попередніх досліджень фізико-механічних властивостей насіння проса та важковідокремлюваних бур'янів обрано неперфоровані поверхні виготовлені з фанери технічної.

Принципіальна схема лабораторного гравітаційного багатоярусного ударного сепаратора представлена на рис. 3.10.

Лабораторний гравітаційний багатоярусний ударний сепаратор складається з живільного бункера 1, чотирьох ярусів опозитно встановлених похилих з поздовжньо-поперечним нахилом неперфорованих дек 2, кожний з яких розташований нижче попереднього і приймачів продуктів поділу 3.



а – вигляд спереду

б – вигляд збоку

1–живильний бункер; 2– неперфоровані деки; 3– приймачі продуктів.

Рисунок 3.10 – Принципова схема лабораторного багатоярусного ударного сепаратора

У цьому сепараторі зернова суміш із живильного бункера послідовно надходить на каскад ярусів дек. Деки мають поперечний і повздовжній нахили і розташовані так, що зернова суміш, після падіння з живильника, випробувавши удар об одну, потім співударяється з опозитно встановленою. Чим вище пружність зерна, тим більшу кількість ударів воно випробовує в проміжку між опозитно розташованими деками, і в результаті зміститься на більшу відстань уздовж поздовжньої осі від живильника. Зійшовши з верхнього яруса, зерно під дією сили ваги знову набирає необхідну швидкість і вдаряється об деку, розташовану в ярусі розташованому нижче, але вже зі зміщенням від живильника на відстань в повздовжньому напрямку, яку воно змістилось в першому ярусі, пропорційну, в остаточному підсумку, пружності зерна. Далі процес повторюється і у всіх інших,

нижчєрозташованих ярусах сепаратора.

На рис. 3.11 представлено загальний вигляд сепаратора.



Рисунок 3.11 – Загальний вигляд лабораторного гравітаційного багатоярусного ударного сепаратора

3.3.2. Лабораторний гравітаційний ударний сепаратор з поперечною подачею

Робочим органом гравітаційного ударного сепаратора з поперечною подачею за результатами попередніх досліджень теж обрано непорфоровану фрикційну поверхню виготовлену з фанери технічної.

Принципiальна схема лабораторного ударного сепаратора з поперечною подачею представлена на рис. 3.12.

Сепаратор складається з живильника 1, розгінного лотка 2, похилої пружної фрикційної поверхні, що сепарує 3, встановленої на рамі 4, механізму 5 регулювання кута α нахилу поверхні, що сепарує, механізму 6 регулювання висоти розташування живильника з розгінним лотком над поверхнею, що сепарує та приймачів 7 продуктів розподілу компонентів суміші.

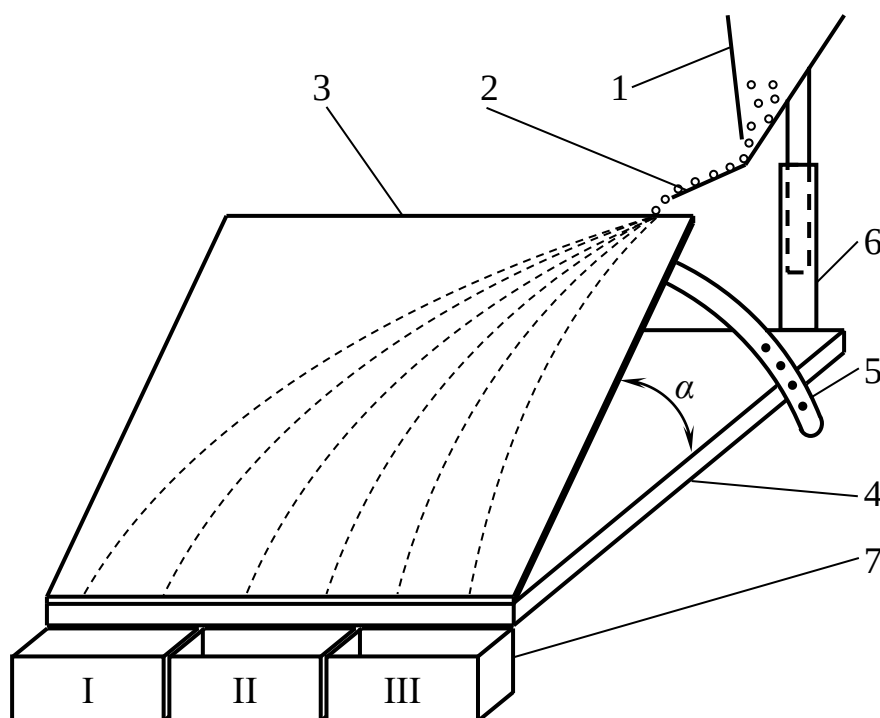


Рисунок 3.12 – Схема лабораторного гравітаційного ударного сепаратора з поперечною подачею

Сепаратор працює наступним чином. Сипка суміш з живильника 1 подається на розгінний лоток 2, на якому під дією сили тяжіння набирає швидкості і падає на пружну фрикційну поверхню, що сепарує 3, де в залежності від пружних властивостей випробовує деяку кількість ударів. У більш пружних частинок ця кількість більша, і вони зміщуються на більшу відстань від лотка в поперечному напрямку до повздовжньої осі поверхні, і далі під дією сили тяжіння частинки в залежності від коефіцієнтів відновлення швидкості і набутої у розгінному лотку швидкості зміщуються по різним траєкторіям в приймачі продуктів розподілу компонентів суміші.

Загальний вигляд лабораторного гравітаційного ударного сепаратора з поперечною подачею представлено на рис. 3.13.

Розроблений лабораторний гравітаційний ударний сепаратор з поперечною подачею для покращення достовірності дослідів додатково оснащений пультом управління 4 та вагами ТВЕ-0,6 (рис. 3.13.)



1 – завантажувальний бункер живильника; 2 – живильник; 3 – лоток;
4 – пульт управління; 5 – ваги ТВЕ-0,6; 6 – ємності для зберігання зерна;
7 – дека, що сепарує

Рисунок 3.13 – Загальний вигляд лабораторного гравітаційного ударного сепаратора з поперечною подачею

Таким чином встановлення розгінного лотка на певній висоті над похилою поверхнею з подачею в поперечному напрямку дає можливість сепарації суміші за пружними властивостями, а його установка перпендикулярно повздовжньої осі похилої поверхні сприятиме зміщенню траєкторій частинок з меншими коефіцієнтами тертя на більшу відстань від місця розгінного лотка і потраплянню їх в дальні приймачі 1 продуктів розподілу компонентів. В приймачі продуктів розподілу, які розташовані ближче до розгінного лотка будуть потрапляти менш пружні частинки суміші з меншими коефіцієнтами тертя. В середні приймачі потраплятиме проміжна фракція.

Висновки за розділом 3

1. Дослідження пружності насіння методом кидання завдяки застосуванню відеозйомки дозволяє на основі аналізу уповільненого кадру точніше визначати коефіцієнт відновлення швидкості при ударі, який істотно

впливає на результат сепарації насіннєвої суміші проса та важковідокремлюваних бур'янів. За допомогою запропонованого приладу, шляхом його переналадки, можна також визначити дальності відскоку зерна від похилої поверхні, що відбиває і тим самим оцінювати можливості сепарації суміші за цим критерієм.

2. Відомі способи та пристрої для визначення коефіцієнта зовнішнього тертя (похила площина з регульованим кутом нахилу, прилад академіка В.А.Желиговського та ін) не пристосовані для визначення зазначеного коефіцієнта для одиничних зерен проса через кулясту форму насіння або специфіки роботи самих пристроїв. За допомогою запропонованих нами приладів можна визначати коефіцієнти статичного та динамічного зовнішнього тертя для кожного окремого зерна виборки. Продуктивність запропонованих приладів в багато разів більша та простіша ніж у відомих.

3. Розроблено лабораторний гравітаційний багатоярусний ударний сепаратор з регульованими параметрами подачі зерна, повздовжнього та поперечного кутів в нахилу опозитно встановлених робочих поверхонь. . Передбачені слідуєчі діапазони зміни вказаних величин: подача зерна 30-80кг/год., повздовжній кут нахилу 5° ...- 30° ; поперечний кут нахилу 25° ... 50° .

4. Розроблено лабораторний гравітаційний ударний сепаратор з поперечною подачею з регульованими параметрами подачі зерна, кута нахилу робочої поверхні та кута нахилу лотка живильного пристрою встановленого з можливістю подачі зерна в напрямку перпендикулярному утворюючої кута нахилу робочої поверхні.

5. Розроблені програма та методика експериментальних досліджень разом з лабораторними сепараторами та використовуваними приладами дозволяють у широких межах змінювати умови проведення дослідів та здійснювати пошук оптимальних параметрів процесу сепарації насіннєвої суміші насіння проса та важковідокремлюваних бур'янів.

РОЗДІЛ 4

РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ СЕПАРАЦІЇ НАСІННЯ ПРОСА

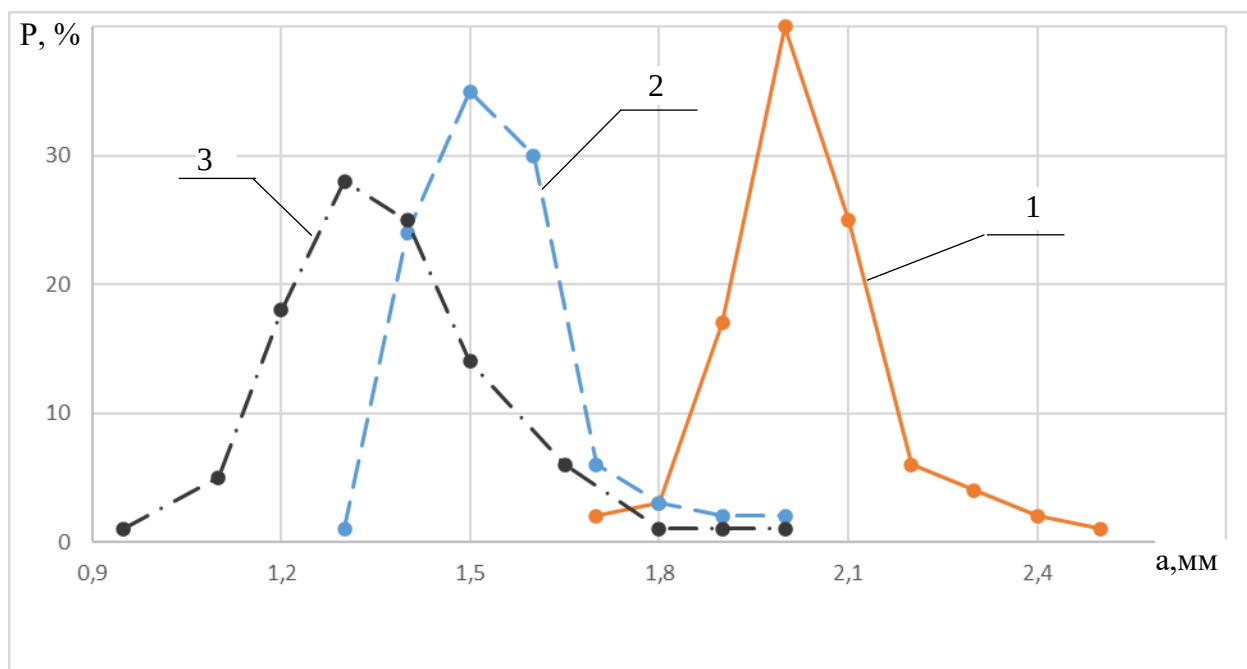
Успішне розділення насінневих сумішей можливе лише в тих випадках коли варіаційні криві ознак розподілення насіння і домішків не перекриваються. Але це можливе, як правило, для небагатьох видів домішків які зустрічаються в насінневих сумішах. Багато видів насіння супутніх бур'янів мають близькі фізико-механічні властивості до насіння основної культури мають велике розсіювання багатьох ознак подільності, які використовуються при сепарації на більшості серійно випускаємих зерноочисних машин. В насінні проса це насіння курячого проса та щеттинника сизого, які вважаються важковіддільними при засміченості ними насіннєвої купи.

Як впливає з вищевикладеного, для гравітаційного ударного сепаратора цими властивостями є насамперед пружність, шорсткість та форма насіння. Пружність і шорсткість виявляються при контакті з робочими органами і залежать не тільки від самих зерен, але і стану поверхонь робочих органів, що диктується, в основному, матеріалом їх виготовлення. При роботі сепаратора насіння регулярно стикаються з відбивною пластиною, тому для відбивної пластини повинен бути обраний пружний матеріал. З кількох поширених матеріалів – метал, фанера технічна, гума технічна, вибрана фанера технічна. По-перше, при пробних випробуваннях на приладі (рис. 3.1) виявилось, що найслабше пружні властивості насіння проса виявляються при ударі об метал. Наприклад, висота відскоку при ударі зерна об фанеру технічну значно вища, ніж при ударі об метал. По-друге, при ударах зерна по фанері та гумі пружні властивості виявляються приблизно однаково, але гума поступається фанері в дешевизні та при виготовленні – у простоті.

У процесі роботи сепаратора зерна перекочуються по робочій поверхні в безвідривному режимі, при якому удари об деку не відбуваються, але проковзування в деяких зонах деки не виключаються (п. 2.5.1). Таким чином, основними параметрами, що підлягають дослідженню, є: коефіцієнт відновлення швидкості при ударі зерна проса та бур'янів по дереву; коефіцієнт тертя зерен за металом; розмірні властивості зерна. Методика визначення цих параметрів дана у попередньому розділі.

4.1. Дослідження розмірних характеристик

За результатами експериментальних досліджень були побудовані варіаційні криві розмірних характеристик насіння проса та важковідокремлюваних бур'янів. Варіаційні криві розмірних характеристик насіння та його засмічувачів наведені на (рис. 4.1).



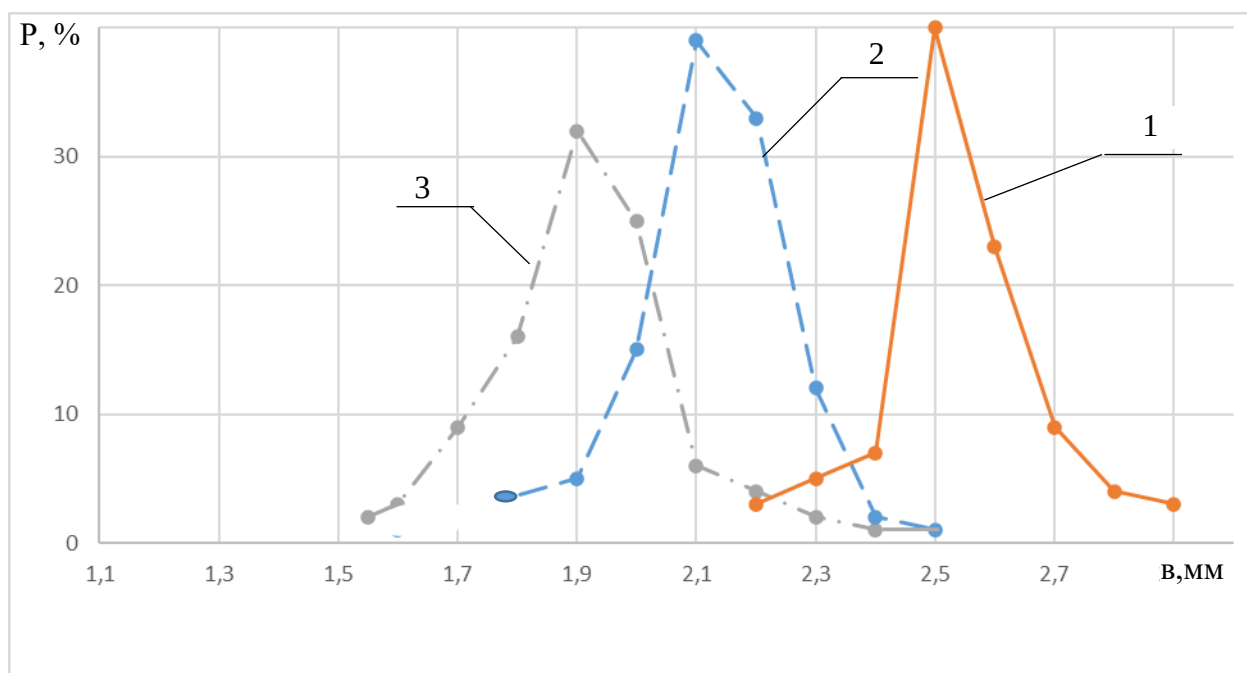
1 – просо; 2 – щетинник сизий; 3 – куряче просо

Рисунок 4.1 – Варіаційні криві товщини насіння

3 аналізу варіаційних кривих розподілу значень ширини насіння

(рис. 4.1) видно, що на решетах з круглими отворами є можливість видалити з насіння проса приблизно третину щетинника сизого та незначну частину насіння курячого проса без втрат насіння основної культури у відході.

Аналіз варіаційних кривих розподілу значень товщини насіння ріпаку (рис. 4.2) показує, що на решетах з довгастими отворами можна виділити близько 69 % курячого проса та 14 % щетинника сизого.

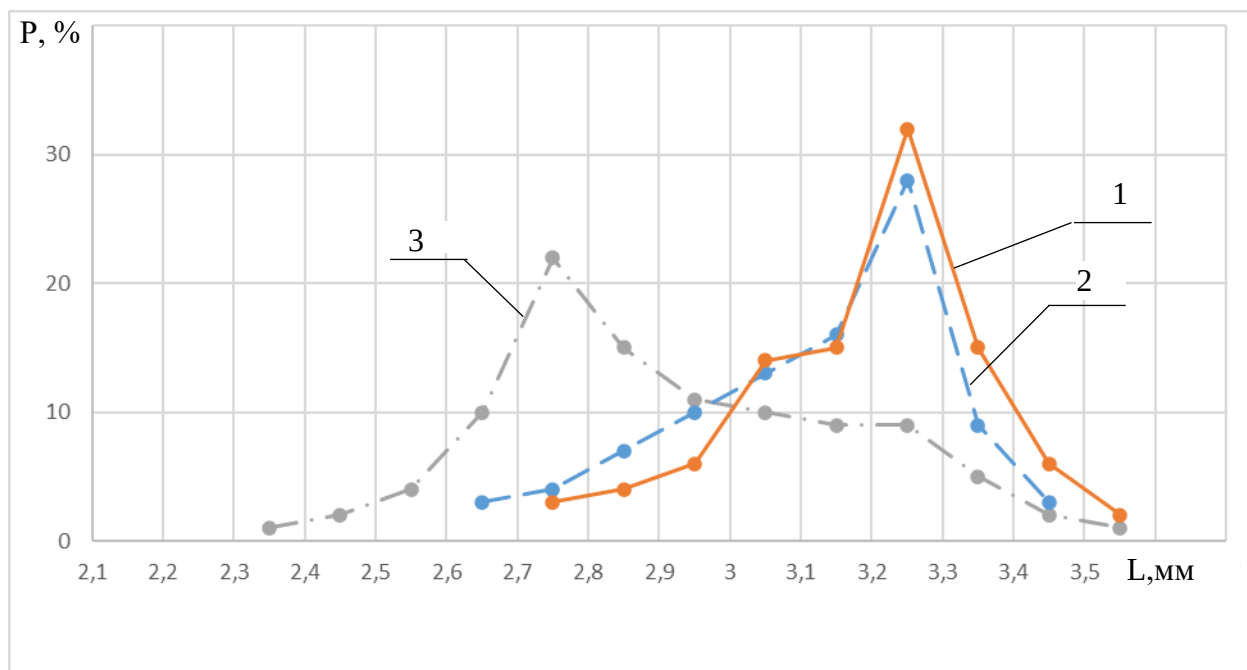


1 – просо; 2 – щетинник сизий; 3 – куряче просо

Рисунок 4.2 – Варіаційні криві ширини насіння

У трієрних циліндрах з насіння ріпаку є можливість виділити деяку частину щетинника сизого (рис. 4.3). Варіаційні криві довжини насіння основної культури та курячого проса, майже – повністю перекриваються, тому виділити його за довжиною неможливо.

Таким чином, вторинне очищення насіння проса від важковідокремлюваних бур'янів за розмірами малоефективне та недоцільне, за винятком видалення частини курячого проса та щетинника сизого на решетах з довгими отворами.



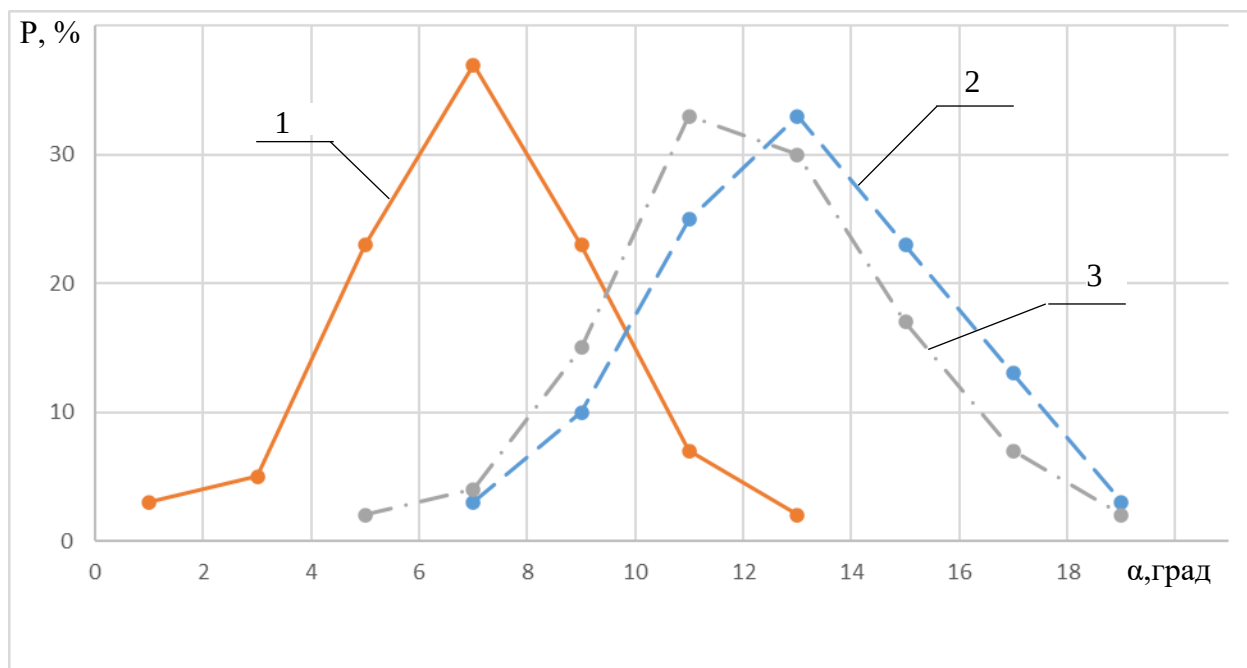
1 – просо; 2 – щетинник сизий; 3 – куряче просо
Рисунок 4.3 – Варіаційні криві довжини насіння

4.2. Дослідження граничних кутів підйому насіння по похилій вібраційній фрикційній поверхні

Для проведення експериментальних досліджень граничного кута підйому використовували насіння суміші проса, що пройшло сепарацію на зерноочисних машинах з повітряно-решітними робочими органами.

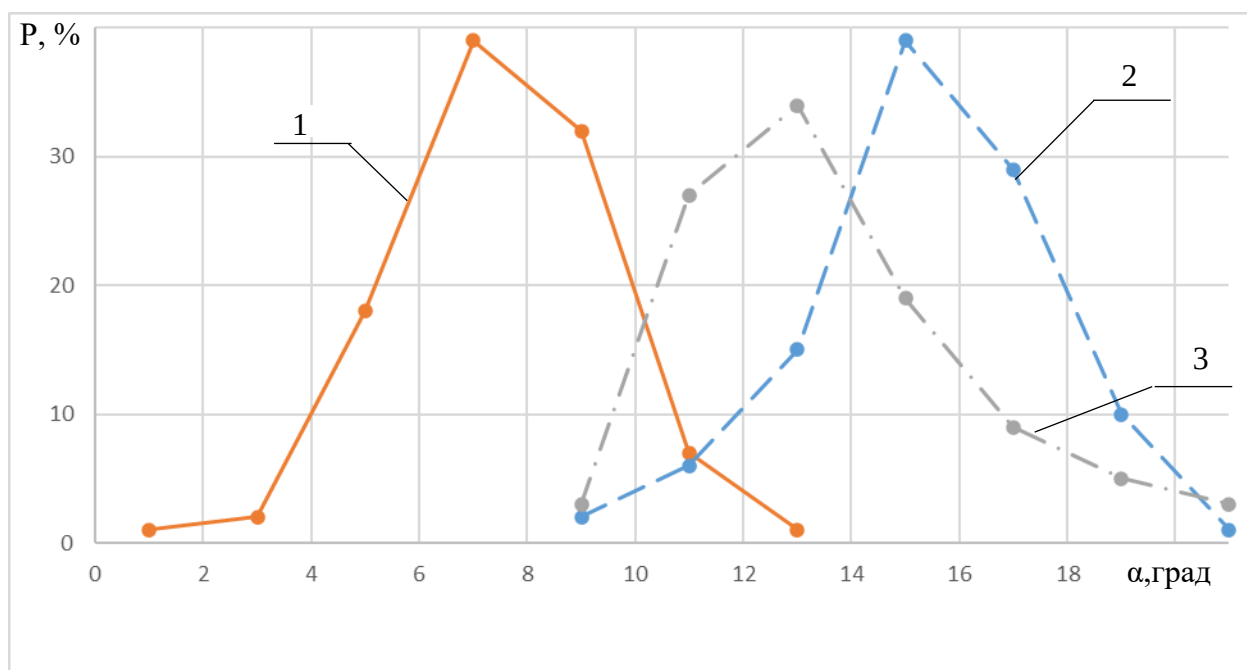
Варіаційні криві розподілу значень граничних кутів підйому насіння проса, щетинника сизого та курячого проса представлені на рис. 4.4.

Аналіз результатів досліджень показує, що найбільш істотних значень виділення з насіння основної культури їх важковідокремлюваних засмічувачів слід очікувати на поверхнях, облицьованих технічною фанерою (рис. 4.5). На фанері технічній є можливість виділити з насіння ріпаку більшу частину щетинника сизого та приблизно половину насіння курячого проса.



1 – просо; 2 – щетинник сизий; 3 – куряче просо

Рисунок 4.4 – Варіаційні криві граничних кутів підйому по вібраційній неперфорованій поверхні. Фрикційний матеріал – сталь



1 – просо; 2 – щетинник сизий; 3 – куряче просо

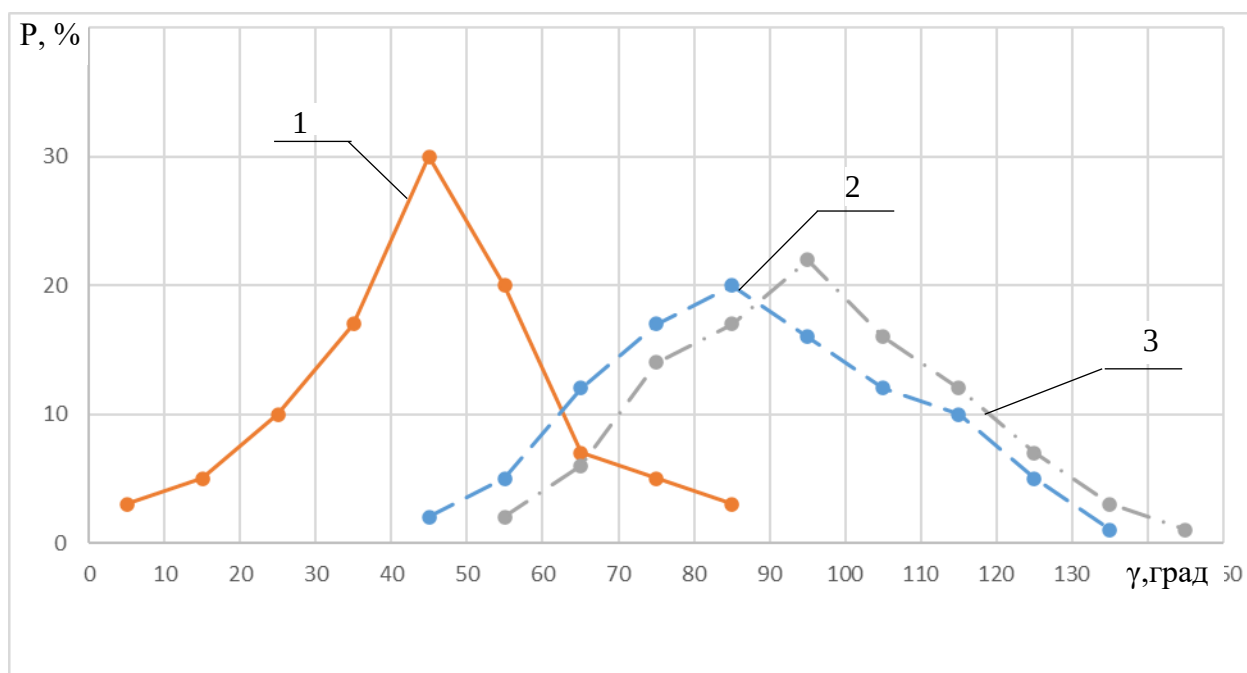
Рисунок 4.5 – Варіаційні криві граничних кутів підйому по вібраційній неперфорованій поверхні. Фрикційний матеріал – фанера технічна

Проведені експериментальні дослідження розподілу значень граничних кутів підйому насіння проса та його важковідокремлюваних

домішок показують, що на неперфорованих фрикційних поверхнях є можливість повністю виділити (при незначних втратах насіння основної культури) або виділити значну кількість насіння щетинника сизого та курячого проса.

4.3. Дослідження траєкторій руху часток по вібраційній фрикційній поверхні

Варіаційні криві розподілу траєкторій руху насіння проса та домішків по вібраційній неперфорованій поверхні показані на рис. 4.6.



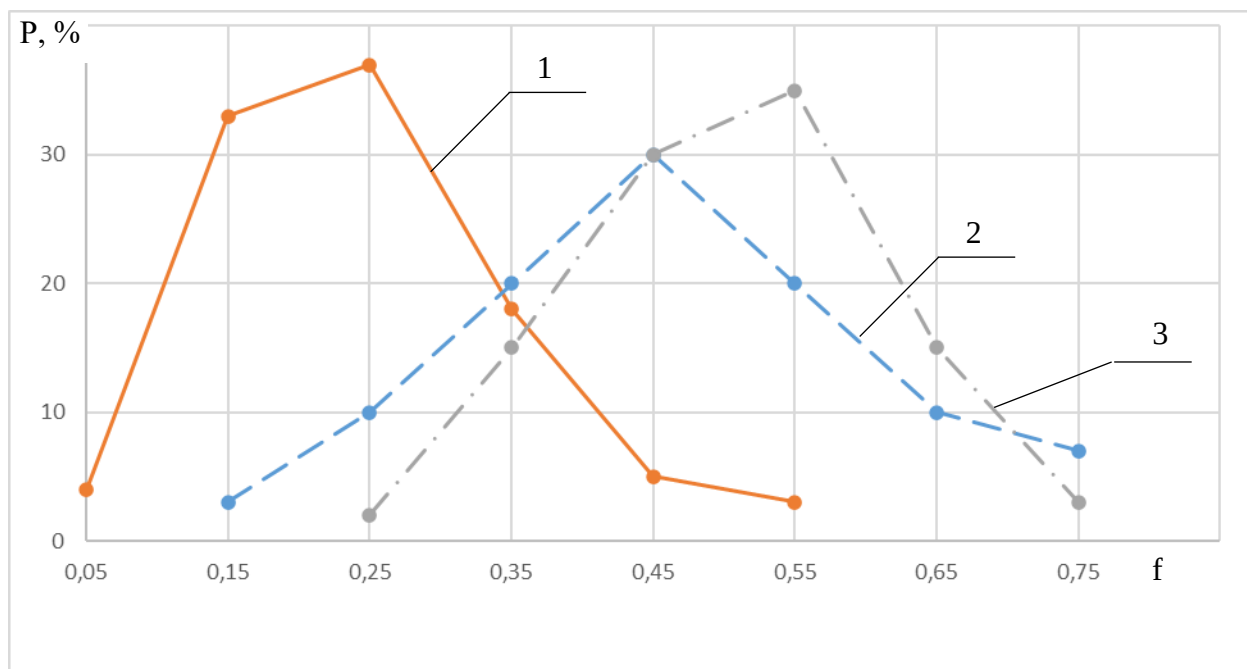
1 – просо; 2 – щетинник сизий; 3 – куряче просо

Рисунок 4.6 – Варіаційні криві траєкторій руху насіння по вібраційній неперфорованій поверхні. Матеріал – фанера технічна

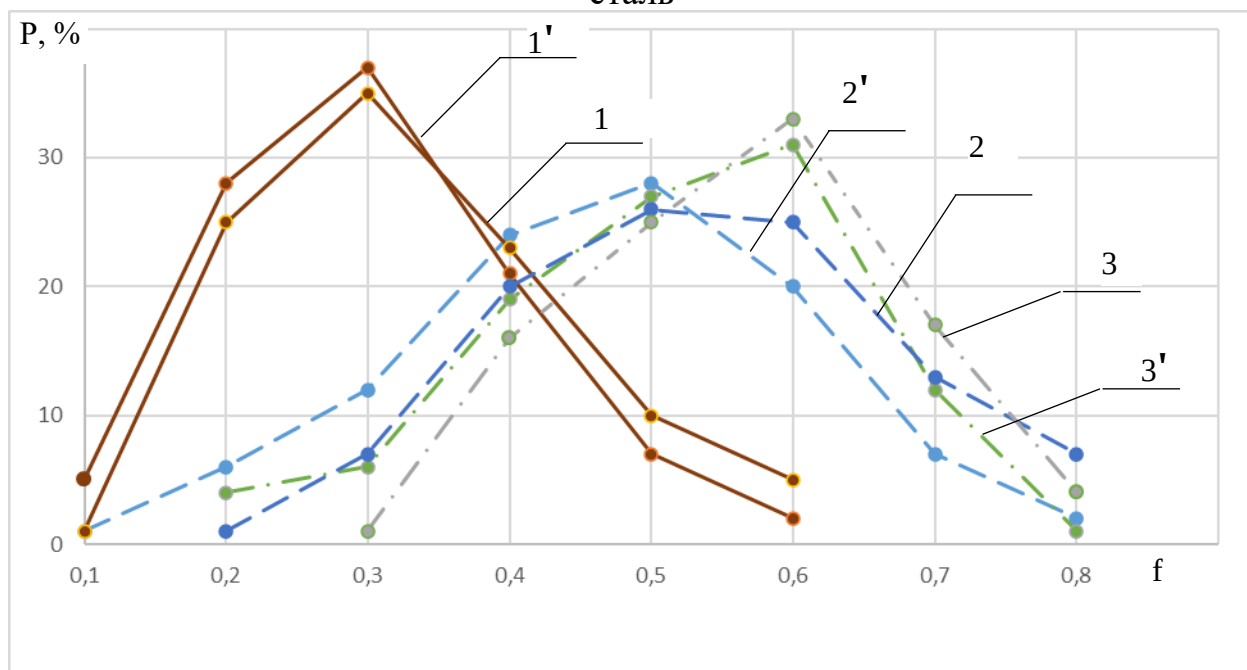
Аналіз варіаційних кривих показує, що за траєкторіями руху насіння по вібруючій поверхні можливо видалити значну частину до 68% проса при повному відділенні від курячого проса, щетинника сизого.

4.4. Дослідження коефіцієнтів тертя

Варіаційні криві розподілу значень коефіцієнтів тертя руху насіння проса та домішок по сталі та по фанері технічній представлені, відповідно, на (рис. 4.7-4.8)



1 – просо; 2 – щетинник сизий; 3 – куряче просо
Рисунок 4.7 – Варіаційні коефіцієнтів тертя ковзання насіння. Матеріал – сталь



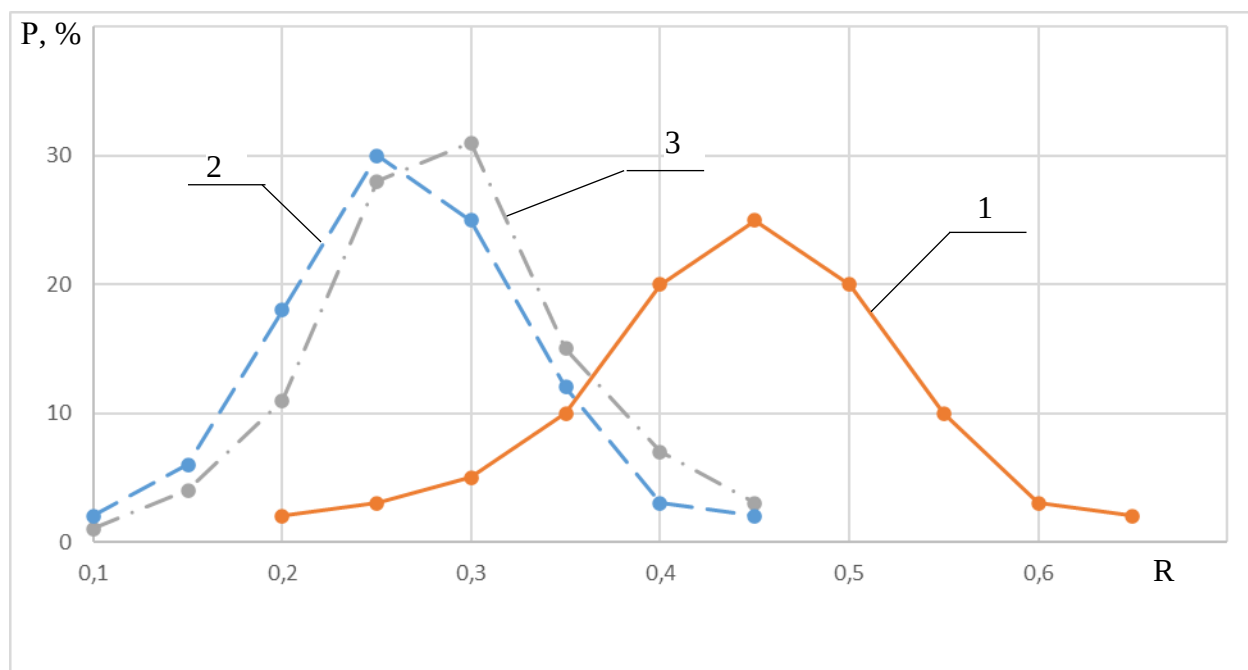
1 – просо; 2 – щетинник сизий; 3 – куряче просо; (статичні);
1' – просо; 2' – щетинник сизий; 3' – куряче просо. (динамічні)
Рисунок 4.8 – Варіаційні коефіцієнтів тертя ковзання насіння. Матеріал – фанера технічна

Варіаційні криві розподілу значень коефіцієнтів тертя показують, що найбільш ефективно процес очищення насіння проса від насіння можна здійснити на поверхнях, облицьованих фанерою технічною. Насіння бур'янів з насіння основної культури за даною ознакою подільності можна виділити на поверхнях, облицьованих фанерою технічною, та листовою сталлю.

На поверхнях облицьованих сталлю можна виділити за коефіцієнтом тертя приблизно третину курячого проса, на фанері технічній ще менше, а відділення щетинника сизого майже неможлива.

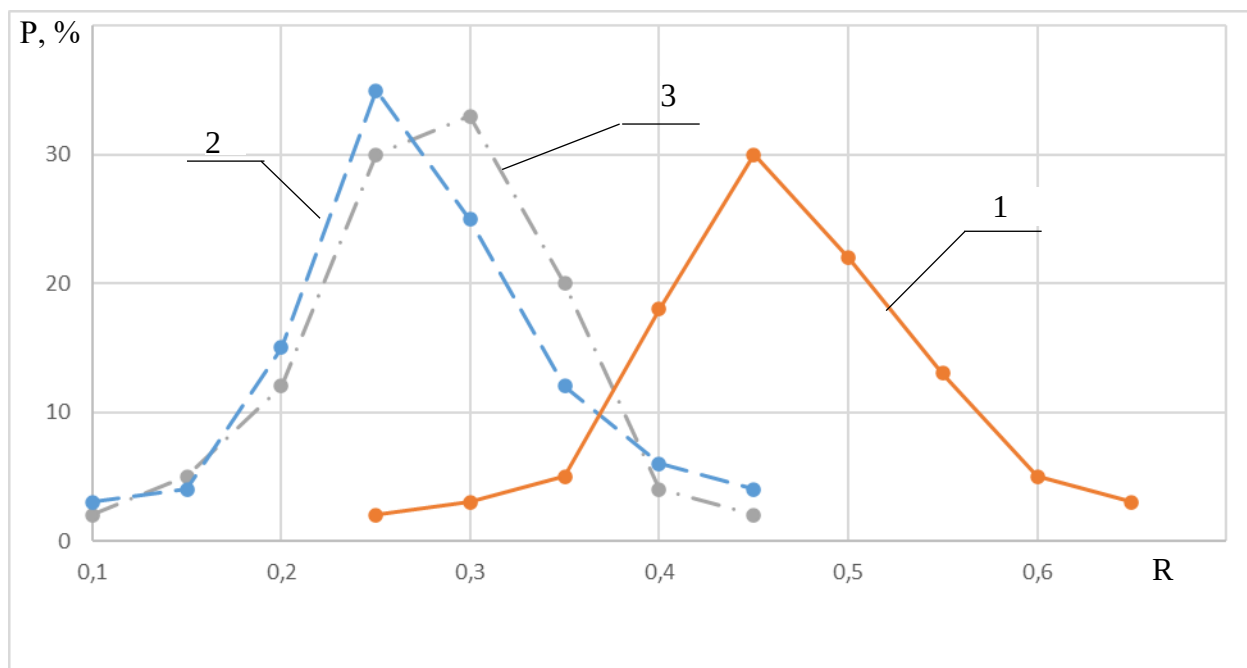
4.5. Дослідження пружних властивостей насіння проса та важковідокремлюваних бур'янів

Варіаційні криві розподілу значень коефіцієнтів відновлення швидкості визначених за допомогою приладу представленого на рис. 3.6 та вирахованих за формулою (3.10) насіння ріпаку та засмічувачів представлені на рис. 4.9.-4.10.



1 – просо; 2 – щетинник сизий; 3 – куряче просо

Рисунок 4.9 – Варіаційні криві коефіцієнтів відновлення швидкості під час удару. Матеріал – сталь



1 – просо; 2 – щетинник сизий; 3 – куряче просо

Рисунок 4.10 – Варіаційні криві коефіцієнтів відновлення швидкості під час удару. Матеріал – фанера технічна

Аналіз результатів досліджень показує, що на поверхні, облицьованій фанерою (рис. 4.10), без втрат насіння проса можна виділити більшу частину курячого проса та щетинника сизого.

Результатом аналізу варіаційних кривих розмірів, коефіцієнтів тертя, пружних властивостей, а також фізико-механічних властивостей враховуючих сукупність фізико-механічних властивостей (коефіцієнтів тертя, шорсткість, пружність, форму) граничних кутів підйому по вібраційній поверхні і кутом траєкторії нахилу по вібраційній фрикційній поверхні та коефіцієнтів відновлення швидкості під час удару є встановлена можливість відділення насіння проса від важковідокремлюваних бур'янів цими ознаками подільності. Найкращих результатів слід очікувати при сепарації насіння проса на вібраційних фрикційних поверхнях, що сепарують, з поздовжньо поперечним кутом нахилу робочого органу за різницею кутів нахилу їх траєкторій. Хороших результатів також слід очікувати і при сепарації насіння проса за коефіцієнтами відновлення швидкості під час удару об нерухому відбивну

поверхню, матеріалом якої є фанера технічна. Це припущення обґрунтовується тим, що варіаційні криві коефіцієнтів відновлення швидкості побудовані при експериментальних дослідженнях з однократним ударом насіння об відбивну поверхню. Але в роботах [8,20] встановлено, що при сепарації багатьох сумішей на сепараторі з багатократним ударом якість сепарації значно зростає. Враховуючи, що продуктивність вібраційних сепараторів з фрикційними неперфорованими поверхнями є невисокою, енергоємність найвища серед спеціальних насіннеочистних машин подальші дослідження будемо проводити на розроблених лабораторних сепараторах: гравітаційному багатоярусному ударному сепараторі та гравітаційному ударному сепараторі з поперечною подачею.

4.6. Визначення можливості сепарації насіння проса за дальністю відскоку після удару об похилу відбивну поверхню

Процес сепарації на похилій відбивній поверхні можна розділити на три стадії:

- отримання початкової швидкості насіння до моменту удару;
- удар насіння об відбивну поверхню, при якому відбувається зміна напрямку та швидкості руху;
- рух насіння до моменту поділу за дальністю відскоку від місця удару.

Схема сепарації насіння за дальністю відскоку на похилій відбивній поверхні представлена на рис. 4.11

За цією схемою швидкість насіння до моменту удару досягається при падінні їх з певної висоти H . Поверхня 1 встановлюється під кутом α до горизонту, при якому забезпечується максимальна дальність відскоку. Цей кут дорівнює $22^\circ 30'$ [41].

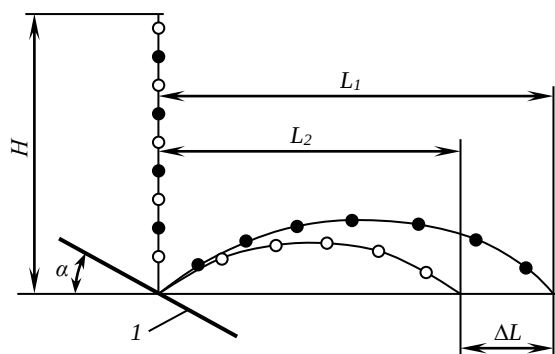
Після удару частинки рухаються по параболічних траєкторіях без

урахування опору повітря.

Більш пружні насіння відскакують на більшу відстань і мають більш продовговату траєкторію руху.

Чим більше різниця в дальності відскоку ΔL пружного (L_1) і не пружного (L_2) зерна, тим вище ефективність його сепарації.

Тобто підвищення ефективності очищення насіння за пружністю визначається умовами, при яких різниця дальності відскоку насіння та засмічувачів максимальна.



1 – відбивна поверхня;

●—○ насіннєва суміш; ●— пружна компонента; ○— не пружна компонента

Рисунок 4.11 – Схема визначення дальності відскоку насіння після удару об робочу поверхню

Швидкість поступального руху насіння до моменту удару залежить від висоти падіння насіння – H , і від аеродинамічного опору середовища, у якому воно рухається, у нашому випадку повітря. Величина сили опору повітря R може бути знайдена за формулою Ньютона:

$$R = kpS(V - V_B)^2, \quad (4.1)$$

де R – сила опору повітря, n

k – коефіцієнт опору повітря;

p – щільність повітря, $кг/м^3$;

S – площа проекції на площину, перпендикулярна напрямку повітряного потоку (міделевий перетин), $м^2$;

V – швидкість руху насіння, $м/с$;

V_B – швидкість повітря потоку, $м/с$.

Коефіцієнт опору повітря може бути виражений через критичну

швидкість насіння $V_{кр}$:

$$K = \frac{mg}{\rho S V_{кр}^2}, \quad (4.2)$$

де m – маса насіння, кг;

g – прискорення вільного падіння, м/с²;

$V_{кр}$ – критична швидкість насіння, м/с.

Величина критичної швидкості насіння може бути знайдена експериментально на вітрильному класифікаторі. Для насіння проса критична швидкість перебуває в інтервалі 4,5...9,0 м/с; для насіння бур'янів 2,5...7,0 м/с.

При падінні насіння у нерухливому повітряному середовищі $V_{\epsilon}=0$, тоді сила опору повітря для насіння визначається з вираження:

$$R = \frac{mgV^2}{V_{кр}^2}, \quad (4.3)$$

Диференціальне рівняння руху насіння при його падінні з деякої висоти на відбивну поверхню має вигляд:

$$m \frac{dV}{dt} = mg - R = mg \left(\frac{V_{кр}^2 - V^2}{V_{кр}^2} \right). \quad (4.4)$$

З рівняння (4.4), після інтегрування та перетворень, одержуємо вираження для швидкості насіння V_1 до моменту удару, як функції висоти падіння H і критичної швидкості $V_{кр}$:

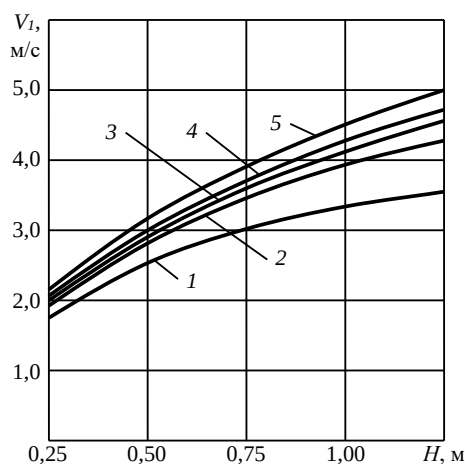
$$V_1 = V_{кр} \sqrt{1 - e^{-2gH/V_{кр}^2}}, \quad (4.5)$$

де: e – основа натурального логарифма.

При розрахунках по формулі (4.5), одержуємо графіки залежності швидкості насіння до моменту удару від висоти падіння при різних рівнях критичної швидкості насіння (рис. 4.12). Тут же наведений графік залежності V_1 від H при падінні в безповітряному середовищі, обчислений по формулі Галілея: $V_1 = \sqrt{2gH}$.

Аналіз отриманих залежностей (рис. 4.12) показує, що, при висотах падіння до 0,5 м відмінності у величинах швидкостей насіння проса до моменту удару не перевищують 5% і, отже, аеродинамічним опором

середовища можна зневажити. З графіків видно, що зниження швидкості насіння під час удару сприяє зменшенню дальності їх польоту після удару і є позитивним чинником, бо має менший діапазон розбіжностей швидкості. При подачі насінної суміші безперервним потоком виникає супутній рух прикордонних шарів повітря. У цьому випадку значення аеродинамічного опору повітря, як фактор, що сприяє поділу суміші, зменшується.

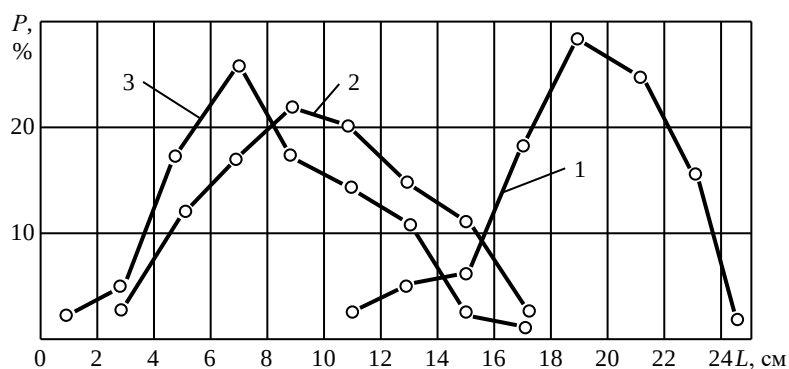


1 – $V_{кр}=4,0$ м/с; 2 – $V_{кр}=6,0$ м/с; 3 – $V_{кр}=8,0$ м/с; 4 – $V_{кр}=10,0$ м/с; 5 – $V_1 = \sqrt{2gH}$

Рисунок 4.12 – Залежність швидкості руху насіння V_1 від висоти падіння H і критичної швидкості $V_{кр}$

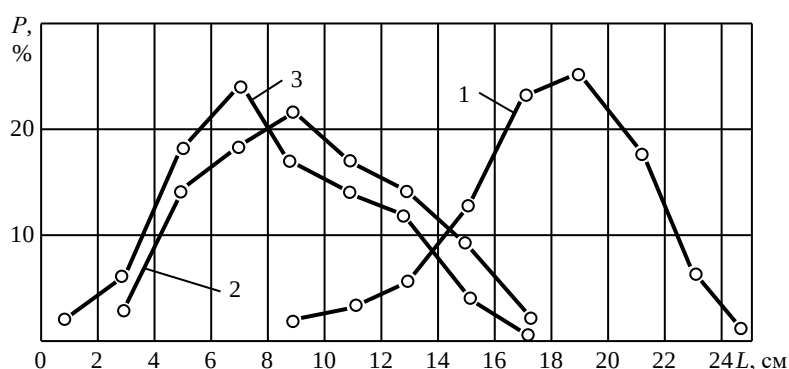
Для встановлення можливості якісної сепарації насіння проса від насіння бур'янів були виконані експериментальні дослідження з визначення дальності відскоку насіння проса та зазначених бур'янів після удару об похилу відбивну поверхню. Приймачі продуктів встановлювались в проміжку між відстанями L_1 та L_2 . Висота з якої падали частинки дорівнювала 0,3 м. При такій висоті пружні властивості насіння проявляються повністю, що доведено в [41].

Однак при сепарації насіння на відбивних сепараторах з багатократним ударом для збільшення кількості ударів, висоту в 0,1 м обирати не доцільно з-за малої дальності польоту після удару і зменшенні при цьому кількості ударів об відбивні поверхні. Більшу висоту скидання ніж 0,3м обирати недоцільно з точки зору зайвих енерговитрат на підйом вихідної суміші до живильника. Графіки дальності відскоку представлено на рис. 4.13 та 4.14



1 – просо; 2 – мишій; 3 – куряче просо

Рисунок 4.13 – Графіки дальності відскоку насіння проса та засмічувачів після удару по фанері технічній



1 – просо; 2 – мишій; 3 – куряче просо

Рисунок 4.14 – Графіки дальності відскоку насіння проса та засмічувачів після удару по сталі

Після аналізу варіаційних кривих проса та бур'янів можна говорити про можливість сепарації насіння проса за дальністю відскоку, але з втратами основної культури у відходи. Насіння курячого проса має більшу мінливість в дальності відскоку але менші перекриття кривих з насінням проса, тому результати сепарації проса від курячого проса будуть кращими. В дійсності насіння проса засмічується обома і більше видами засмічувачів, тому для сепарації таких сумішей потрібно використовувати гравітаційні сепаратори з багатократним ударом, що підтверджено багатьма дослідженнями під час сепарації інших культур [20,23,41]. Як видно з рис. 4.13 та 4.14 дещо більші розбіжності в дальності відскоку проса та засмічувачів отримані після удару насіння проса та засмічувачів по фанері технічній, тому що перекриття варіаційних кривих менші.

4.7. Визначення раціональних параметрів процесу сепарації насіння проса на гравітаційному багатоярусному сепараторі

Експериментальні дослідження проводились на розробленому та виготовленому лабораторному сепараторі описаному в попередньому розділі (рис. 3.3) Для проведення експериментів на розробленому сепараторі був обраний трирівневий некомпозиційний план Бокса-Бенкіна 2-го порядку. Для визначення факторів, які найбільше впливають на критерій оптимізації, застосований метод апіорного ранжирування. В результаті виділено три основні фактори що варіюють: x_1 – повздовжній кут α , град.; x_2 – подача зерна Q , кг/год.; x_3 – поперечний кут β , град.; Верхній та нижній рівні факторів були призначені з конструктивних міркувань і за результатами теоретичних досліджень.

Як параметр оптимізації були обрані маси зерна в лотках №3 і №4 в які надходить кондиційне насіння. Масу зерна з лотка №2 пропонується використовувати, або як корм птиці, або направляти на повторну обробку. В лотку №1 містяться відходи.

У таблиці 4.1 наведені значення факторів і інтервали варіювання факторів.

Таблиця 4.1 – Значення факторів і інтервали варіювання факторів

Фактор			Рівні варіювання фактора			Інтервал варіювання
Найменування	Позначення					
	натуральне	кодове	-1	0	+1	
Повздовжній кут α , град.	X_1	x_1	2	4	6	2
Подача зерна, Q , кг/час.	X_3	x_3	40	50	60	10
Поперечний кут β , град.	X_2	x_2	30	35	40	5

В ході планування експериментальних досліджень задаємося нижченаведеними параметрами: надійність результатів досліду – 0,95; допустима похибка – $\varepsilon = \pm \sigma$; число повторності дослідів – 3. Для усунення помилок використовували критерій Стюдента.

Після проведення експерименту відповідно до матриці планування проведена статистична обробка. Отримані результати наведені в табл. 4.2 і табл. 4.3.

Таблиця 4.2 – Результати реалізації матриці планування, критерій оптимізації
маса зерна в лотку №3

№ п/п	№ виміру	Результати експериментів			$\bar{y}$	$\sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})^2$	s_f^2	$\hat{y}$	$\sum_{i=1}^N (\bar{y} - \hat{y})^2$
		y_1	y_2	y_3					
1	14	19,3	18,9	18,2	18,8	0,62	0,02	18,64	0,0251
2	9	18,1	18	17,9	18	0,02	0,0006	18,158	0,02506
3	15	18,2	18,9	19,4	18,8	0,72	0,0242	18,075	0,5751
4	10	16,8	16,6	16,5	16,6	0,0466	0,00156	17,3916	0,5751
5	3	17,9	18,1	17,7	17,9	0,08	0,00267	18,1833	0,080278
6	5	17,4	17,5	17,7	17,5	0,0466	0,00156	17,25	0,080278
7	2	15,4	15,7	16,1	15,7	0,2466	0,00822	16,3667	0,40111
8	6	17,3	16,4	16,6	16,7	0,44666	0,01488	16,1333	0,401111
9	7	20,8	21,4	21	21,0	0,18666	0,00622	20,9416	0,015625
10	11	20,3	20,5	20,9	20,5	0,18666	0,00622	20,6917	0,015625
11	4	16,9	16,5	17,7	17,0	0,746666	0,02488	16,5583	0,225625
12	12	16,1	16,6	16,9	16,5	0,32666	0,01089	17,0083	0,225625
13	1	21,4	22,8	22,1	22,1	0,9800	0,03266	22,1	0,065309
14	13	21,5	21,8	21,7	21,6	0,046666	0,00156	21,6667	0,031605
15	8	21,4	21,5	22,4	21,7	0,606666	0,02022	21,7667	0,006049

Таблиця 4.3 – Результати реалізації матриці планування, критерій оптимізації
маса зерна в лотку №4

№ п/п	№ виміру	Результати експериментів			$\bar{y}$	$\sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})^2$	s_f^2	$\hat{y}$	$\sum_{i=1}^N (\bar{y} - \hat{y})^2$
		y_1	y_2	y_3					
1	14	3,25	3,31	3,31	11,9	0,02	0,00067	11,679	0,048767
2	9	2,69	2,76	2,71	11,1	0,046667	0,0015	11,3875	0,048767
3	15	1,89	2,01	1,93	11,8	0,44667	0,01488	11,5291	0,113906
4	10	1,69	1,65	1,67	10,1	0,60667	0,02022	10,5041	0,113906
5	3	2,55	2,64	2,62	10,1	0,02	0,00067	10,425	0,105625
6	5	2,45	2,43	2,44	10,1	0,32667	0,01088	9,84166	0,105625
7	2	1,53	1,49	1,55	9,96	0,04666	0,00156	10,2	0,054444
8	6	1,94	1,88	1,90	9,7	0,72	0,024	9,46667	0,054444
9	7	1,59	1,62	1,62	12,8	0,44667	0,01489	12,7625	0,010851
10	11	2,18	2,24	2,13	13,1	0,56	0,01867	13,204	0,010851
11	4	1,94	1,91	1,90	10,2	0,32667	0,01089	10,2208	0,000156
12	12	2,26	2,32	2,27	10,5	0,24	0,008	10,5125	0,000156
13	1	0,90	0,89	0,87	13,5	0,32	0,01066	13,5	0,000178
14	13	0,99	0,92	0,95	13,5	0,02	0,00066	13,5	0,000178
15	8	0,91	0,93	0,94	13,4	0,2616	0,00872	13,46	0,000711

Після підстановки коефіцієнтів регресії отримаємо наступні рівняння:

$$y_1 = 21,84 + 0,29x_1 - 0,05x_2 + 0,18x_3 + 0,33x_1x_2 + 2,02x_2x_3 + 0,73x_1x_3 - 2,8x_1^2 - 0,98x_2^2 - 2,06x_3^2; \quad (6)$$

$$y_2 = 13,49 + 0,33x_1 - 0,18x_2 - 0,04x_3 + 0,26x_1x_2 + 1,31x_2x_3 + 0,15x_1x_3 - 1,95x_1^2 - 0,26x_2^2 - 1,55x_3^2; \quad (7)$$

Перевірку адекватності рівнянь проводили шляхом порівняння дисперсії адекватності з дисперсією параметра оптимізації за критерієм Фішера. В результаті отриманих розрахунків $F_{\text{табл.}} > F_{\text{расч.}}$. Отже рівняння (6) і (7) адекватні (табл. 4.4).

Таблиця 4.4 – Результати статистичної обробки рівнянь регресії

№ п/п	Позначення	Маса в лотку №3	Маса в лоту №4
1	S_y^2	0,0059	0,0049
2	S	0,076	0,07
3	S_{ad}^2	0,4581	0,1337
4	$F_{\text{расч.}}$	1,677	0,523
5	$F_{\text{табл.}}$	3,8625	3,8625
6	$G_{\text{расч.}}$	0,1844	0,1634
7	$G_{\text{табл.}}$	2,0423	2,0423

Після відкидання незначних коефіцієнтів регресії рівняння прийняли вид:

$$y_1 = 21,84 + 0,29x_1 + 0,18x_3 + 0,33x_1x_2 + 2,02x_2x_3 + 0,73x_1x_3 - 2,8x_1^2 - 0,98x_2^2 - 2,06x_3^2; \quad (4.6)$$

$$y_2 = 13,49 + 0,33x_1 - 0,18x_2 - 0,04x_3 + 0,26x_1x_2 + 1,31x_2x_3 + 0,15x_1x_3 - 1,95x_1^2 - 0,26x_2^2 - 1,55x_3^2; \quad (4.7)$$

Використовуючи дані розрахунку з табл.4.5 побудували двовимірні перерізи поверхонь відгуку: Маса в лотку №3 и маса в лотку №4.

Для побудови графіків використовували програми MathCad v14 і Компас 3D V15 [9]. Графіки представлені на рис.4.15-4.16.

Таблиця 4.5 – Результати канонічних перетворень рівнянь регресії для
двовірних перетинів поверхонь відгуків

	Пара- метри опти- мізації	Не відомі рів- няння	Коефіцієнти рівняння		Координати нового центру, S			Знач. параме- тра опт. в точці S	Значення факторів в центрі S			Кут пов. осей в цен- тре S $\varphi, ^\circ$
			B_1	B_2	x_{s1}	x_{s2}	x_{s3}		α , град	Q, кг/год	β , град.	
1	Маса в лотке №3, г.	$x_1=0$	-1,27	-1,78		0,17	-0,08	21,76		51,73	34,58	9
		$x_2=0$	-2,03	-2,79	-0,14		0,13	21,72	3,72		35,67	39
		$x_3=0$	-1,51	-2,26	-0,11	0,04		21,78	3,78	50,37		21
2	Маса в лотке №4, г	$x_1=0$	-0,17	-1,64		-0,25	0,19	13,39		47,45	36	13
		$x_2=0$	-1,68	-1,88	-0,17		0,01	13,38	3,66		34,96	21
		$x_3=0$	-0,42	-1,79	-0,09	-0,62		13,47	3,83	43,81		21

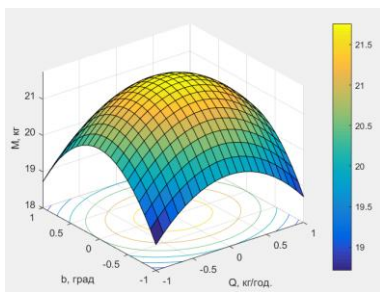
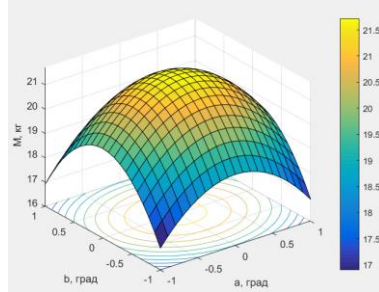
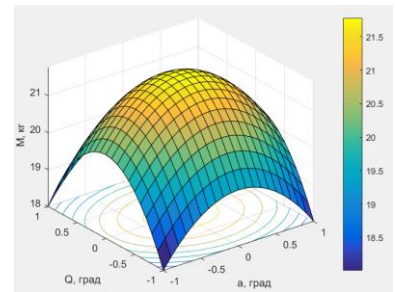
а) $x_1 = 0$ в) $x_2 = 0$ с) $x_3 = 0$

Рисунок 4.15 – Поверхні відгуку маси зерна в лотку №3

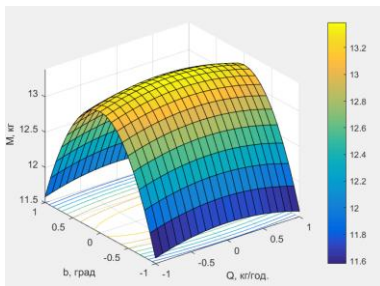
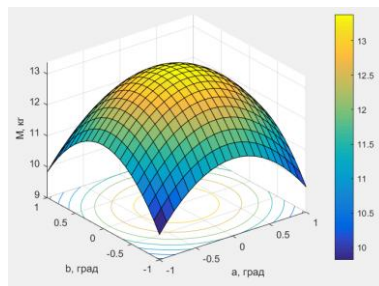
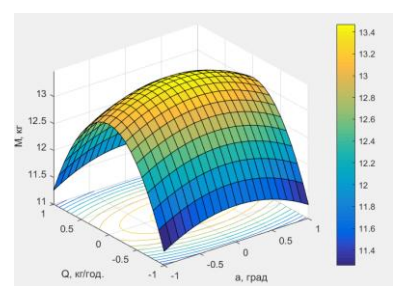
а) $x_1 = 0$ в) $x_2 = 0$ с) $x_3 = 0$

Рисунок 4.16 – Поверхні відгуку маси зерна в лотку №4

Для забезпечення інтерпретації отриманих результатів дослідження щодо поверхні відгуку був використаний метод двовірних перерізів. Побудова двовірних перерізів функції відгуку виконувались в такий спосіб. В отриману раніше математичну модель підставлялися заковдані значення всіх факторів, крім будь-якого одного, причому в першу чергу досліджувалися перетини, які мають найбільш практичне значення. Далі в

отриманому виразі визначався центр поверхні відгуку та проводилося канонічне перетворення моделі другого порядку. Після канонічного перетворення визначався тип поверхні відгуку та проводився графо-аналітичний аналіз отриманого виразу.

Для оптимізації конструктивно-технологічних параметрів сепаратора побудовано двовимірні перерізи поверхонь відгуків (рис. 4.17; 4.18; 4.19).

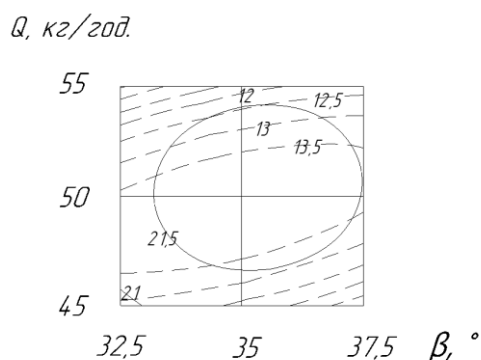


Рисунок 4.17 – Двовірний перетин поверхонь відгуку, що характеризує вплив поперечного кута β (фактор x_3) і подачі зерна Q кг/год. (фактор x_2) на масу зерна в лотку №3 (пунктирна лінія) і масу зерна в лотку №4 суцільна лінія) при $x_1=0$

З графіка зображеного на рис. 4.17 видно, що максимальне значення маси зерна в лотку №3 і лотку №4 має місце при значенні поперечного кута $\beta = 35^\circ$ та подачі зерна $Q=50$ кг/год. Також можна зробити висновок, що допустимі значення аналізованих факторів можуть перебувати в межах: поперечний кут від $34,5^\circ$ до 36° і подача зерна Q від 51,7 до 47,5 кг/год.

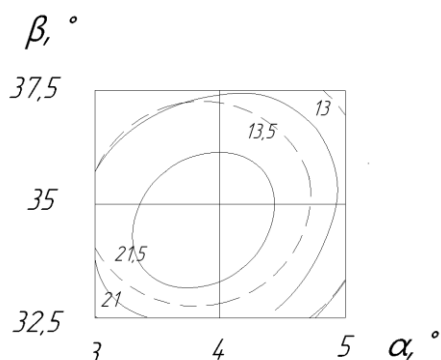


Рисунок 4.18 – Двовірні перерізи поверхонь відгуку, що характеризують вплив повздовжнього кута α (фактор x_1) та поперечного кута β (фактор x_3) на масу зерна у лотку №3 (пунктирна лінія) та масу зерна у лотку №4 (суцільна лінія) при $x_2 = 0$

З графіка зображеного на рис. 4.18 видно, що максимальне значення маси зерна в лотку №3 та лотку № 4 має місце при значенні поперечного кута $\beta = 34,5^\circ$ та продольному куті $3,8^\circ$. Також можна зробити висновок, що допустимі значення аналізованих факторів можуть перебувати в межах: поперечний кут від $34,5^\circ$ до $34,9^\circ$ і поздовжній кут – α від $3,6^\circ$ до $3,9^\circ$.

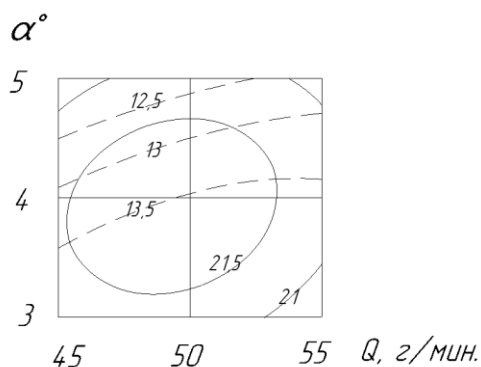


Рисунок 4.19 – Двовимірні перерізи поверхонь відгуку, що характеризують вплив поперечного кута α (фактор x_1) та подачі зерна Q кг/год. (фактор x_2) на масу зерна в лотку №3 (пунктирна лінія) та масу зерна в лотку №4 (суцільна лінія) при $x_3=0$

З графіка на рис. 4.19 видно, що максимальне значення маси зерна в лотку №3 та лотку № 4 має місце при значеннях поперечного кута $\alpha = 3,8^\circ$ та подачі зерна $Q=52,5$ кг/год. Також можна зробити висновок, що допустимі значення аналізованих факторів можуть знаходитися в межах: поперечного кута α від $3,7^\circ$ до $3,8^\circ$ і подача зерна Q від 43,8 до 50,3 кг/год.

Вихід очищеної фракції при виборі раціональних параметрів становить 70 %.

4.8. Визначення раціональних параметрів процесу сепарації насіння проса на гравітаційному ударному сепараторі з поперечною подачею

Експериментальні дослідження проводились на установці описаній в попередньому розділі (рис. 3.8).

Експерименти проводились у наступній послідовності. Зерно завантажували в бункер. Подачу зерна регулювали шляхом зміни обертів на валу живильника за допомогою частотного перетворювача і направляли в лоток і далі на робочу поверхню. Час проведення кожного дослідження фіксували секундоміром. Зважування вмісту ємностей здійснювали вагами ТВЕ-0,6.

Матриця плану та результати експериментів наведені у табл. 4.6.

Таблиця 4.6 – Матриця плану Бокса – Бенкіна

№ п/п	x_1	x_2	x_3	x_1x_2	x_1x_3	x_2x_3	x_1^2	x_2^2	x_3^2	y_3	y_4
1	1	1	0	1	0	0	1	1	0	19,52	13,23
2	-1	-1	0	1	0	0	1	1	0	18,22	12,45
3	1	-1	0	-1	0	0	1	1	0	19,16	12,93
4	-1	1	0	-1	0	0	1	1	0	16,72	11,81
5	1	0	1	0	1	0	1	0	1	17,78	11,23
6	-1	0	-1	0	1	0	1	0	1	17,44	11,68
7	1	0	-1	0	-1	0	1	0	1	16,29	11,09
8	-1	0	1	0	-1	0	1	0	1	16,76	11,36
9	0	1	1	0	0	1	0	1	1	21,07	13,99
10	0	-1	-1	0	0	1	0	1	1	21,00	14,29
11	0	1	-1	0	0	-1	0	1	1	16,61	11,72
12	0	-1	1	0	0	-1	0	1	1	16,56	11,42
13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	21,86	13,04
14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	21,36	14,82
15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	21,68	14,89

У цій таблиці x_1 – кут нахилу деки ($x_1 = -1$ (30°), $x_1 = 0$ (35°), $x_1 = +1$ (40°); x_2 — подача матеріалу Q ($x_2 = -1$ (75 г/хв.), $x_2 = 0$ (150 г/хв.), $x_2 = +1$ (225 г/хв.) и x_3 — кут нахилу живильника β ($x_3 = -1$ (25°), $x_3 = 0$ (35°), $x_3 = +1$ (45°).

Кодування рівнів факторів проводилось за формулою:

$$x_i = \frac{X_i - X_{0i}}{\varepsilon_i}, \quad (4.8)$$

де x_i – кодоване значення фактора;

X_i – натуральне значення фактора;

X_{0i} – натуральне значення фактора на нульовому рівні;

ε_i – натуральне значення інтервалу варіювання відповідного фактора.

Як параметр оптимізації у були обрані маса проса M_3 в лотку № 3 і маса проса M_4 в лотку № 4.

Помилка експерименту S_y та дисперсія відтворюваності S_{y^2} знаходяться за результатами трьох дослідів на нульовому рівні факторів табл. 1 (досліди 13–15). Вони відповідно становлять $S_y = 0,0981$ та $S_{y^2} = 0,0096$.

В результаті проведених розрахунків було отримано такі коефіцієнти рівняння:

– для параметра оптимізації M_3 :

$$b_0 = 21,63; b_1 = 0,4504; b_2 = -0,1270; b_3 = 0,1032; b_{12} = 0,4632; \\ b_{13} = 0,5436; b_{23} = 2,2230; b_{11} = -2,4878; b_{22} = -0,7427; b_{33} = -2,0803;$$

– для параметра оптимізації M_4 :

$$b_0 = 14,92; b_1 = 0,15; b_2 = 0,04; b_3 = -0,1; b_{12} = 0,23; b_{13} = 0,11; b_{23} = 1,29; \\ b_{11} = -1,92; b_{22} = -0,04; b_{33} = -1,67;$$

Значимість коефіцієнтів визначається за формулою:

$$b_i = \pm t \cdot S_{b_i} \quad (4.9)$$

де: t – табличні значення критерію Стюдента при заданому рівні довіри (значущості) α і ступеня свободи f ;

S – помилка відтворюваності ($t = 4,3$ при $\alpha = 0,05$);

S_{b_i} – помилка визначення коефіцієнтів b_i , яка визначається за формулою

$$S_{b_i} = S_{b_i} = \sqrt{S_{b_i}^2}, \quad (4.10)$$

де: $S_{b_i}^2$ – дисперсія щодо коефіцієнтів [41].

Таблиця 4.7 – Значення коефіцієнтів для параметра оптимізації M_3

	b_0	b_1	b_2	b_3	b_{12}	b_{13}	b_{23}	b_{11}	b_{22}	b_{33}
b_i	21,6348	0,4504	-0,1270	0,1032	0,4632	0,5436	2,2230	-2,4878	-0,7427	-2,0803
S_{b_i}	0,2988		0,1829			0,2587			0,3423	
b^*	21,6348	0,4504	0,0000	0,0000	0,4632	0,5436	2,2230	-2,4878	-0,7427	-2,0803

Таблиця 4.8 – Значимість коефіцієнтів параметра оптимізації M_4

	b_0	b_1	b_2	b_3	b_{12}	b_{13}	b_{23}	b_{11}	b_{22}	b_{33}
b_i	14,923	0,1505	-0,0401	-0,0957	0,2342	0,1115	1,2859	-1,9155	-0,3995	-1,6661
S_{b_i}	0,1279		0,0783			0,1108			0,1466	
b^*	14,9230	0,1505	0,0000	-0,0957	0,2342	0,1115	1,2859	-1,9155	-0,3995	-1,6661

В результаті розрахунків коефіцієнти b_2 , b_3 визнані незначними у рівнянні оптимізації y_3 та коефіцієнти b_2 , b_3 у рівнянні оптимізації y_4 .

Рівняння мають такий вигляд:

$$y_3 = 21,63 + 0,45x_1 + 0,46x_1x_2 + 0,54x_1x_3 + 2,22x_2x_3 - 2,49x_1^2 - 0,74x_2^2 - 2,08x_3^2; \quad (4.11)$$

$$y_4 = 14,92 + 0,15x_1 - 0,10x_3 + 0,23x_1x_2 + 0,11x_1x_3 + 1,29x_2x_3 - 1,92x_1^2 - 0,4x_2^2 - 1,67x_3^2. \quad (4.12)$$

Перевірка адекватності цих рівнянь здійснюємо за критерієм Фішера, результати перевірки наведені в табл. 4.9

Таблиця 4.9 – Перевірка адекватності рівнянь за критерієм Фішера

Функція оптимізації	Табличне значення критерію Фішера F табл.	Розрахункове значення критерію Фішера
y_3	3,8625	0,3014
y_4	3,8625	0,6589

В результаті отриманих розрахунків $F_{\text{табл.}} > F_{\text{расч.}}$. Отже рівняння (11) і (12) адекватні (табл. 4.9). Аналіз рівняння (11) (12) показує, що найбільший вплив збільшення маси M_3 і M_4 надає кут нахилу деки α . Для визначення значень факторів, що забезпечують максимальне завантаження лотків №3 та №4, складено системи диференціальних рівнянь та проведено їх канонічне перетворення.

Результати канонічних перетворень рівнянь регресії для двовимірних зв'язків наведено в табл. 4.10.

Таблиця 4.10 – Результати канонічних перетворень рівнянь регресій для
двовірних перетинів поверхонь відгуків

	Не відомі рівнян	B1	B2	Xs1	Xs2	Xs3	Y	α , град Дека	Q, г/хв.	β , град Живільник	a
M ₃ , г	x ₁ =0	-0,92	-1,91		0,00	0,00	21,63	-	150,00	25,00	9
	x ₂ =0	-1,96	-2,35	-0,19		0,05	21,45	34,04	-	25,25	39
	x ₃ =0	-2,42	-0,81	-0,20	0,13		21,41	33,98	159,58	-	22
M ₄ , г	x ₁ =0	-0,38	-1,69		-0,12	0,04	14,90		140,66	25,19	13
	x ₂ =0	-1,73	-1,88	-0,08		-0,05	14,90	34,62		24,74	21
	x ₃ =0	-0,52	-1,80	-0,08	0,05		14,89	34,58	153,72		21

Використовуючи дані розрахунку із табл. 4.10 побудували двовірні перерізи поверхонь відгуку: маса в лотку №3 і маса в лотку №4.

Для побудови графіків використовували програми MathCad v14 та Компас 3D V15. Графіки представлені на рис. 4.20; 4.21; 4.22.

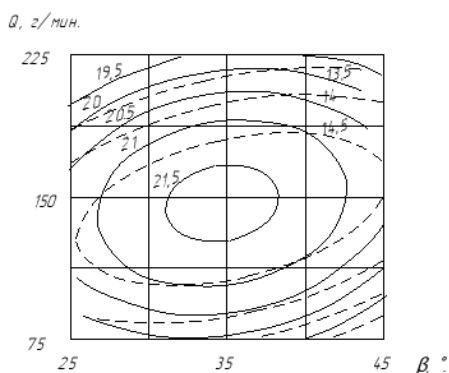


Рисунок 4.20 – Двовимірні перерізи поверхонь відгуку, що характеризують вплив кута лотка β (фактор x_3) та подачі зерна Q г/хв. (фактор x_2) на масу зерна в лотку №3 (суцільна лінія) та масу зерна в лотку №4 (пунктирна лінія)

З графіків на рис. 4.20 слід, що максимальне значення маси зерна в лотку №3 і лотку №4 має місце при значенні кута живильника $\beta = 35^\circ$ і подачі зерна $Q = 150$ г/хв. На підставі цього рисунку можна також зробити висновок, що допустимі значення аналізованих факторів (при допустимому значенні маси №3 і маси №4) можуть бути в межах: кута живильника від 32° до 38° і подача зерна Q від 130 до 169 г/хв.

З графіків на рис. 4.21 слідує, що максимальне значення маси зерна в лотку №3 і лотку №4 має місце при значенні кута живильника $\beta = 35^\circ$ і кута деки $\alpha = 34^\circ$.

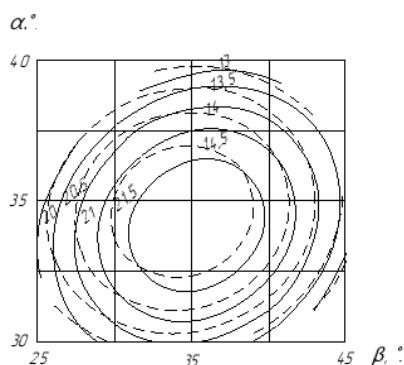


Рисунок 4.21 – Двовимірні перерізи поверхонь відгуку, що характеризують вплив кута живільника β (фактор x_3) та кута деки α (фактор x_1) на масу зерна у лотку №3 (суцільна лінія) та масу зерна у лотку №4 (пунктирна лінія)

На підставі цього рисунку можна також стверджувати, що допустимі значення факторів, що розглядаються (при допустимому значенні маси №3 і маси №4) можуть знаходитися в межах: кут живільника β від 32° до 38° і кута деки α від 32° до 37° .

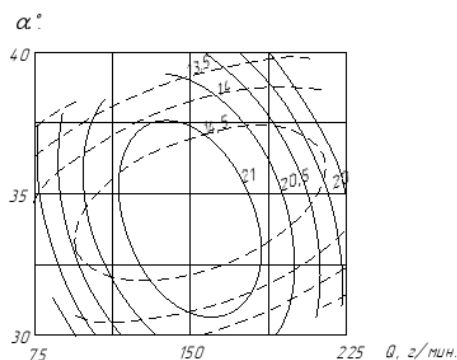


Рисунок 4.22 – Двовимірні перерізи поверхонь відгуку, що характеризують вплив подачі зерна Q г/хв. (фактор x_2) та кута деки α (фактор x_1) на масу зерна в лотку №3 (суцільна лінія) та масу зерна в лотку №4 (пунктирна лінія)

З графіків на рис. 4.22 слідує, що максимальне значення маси зерна в лотку №3 та лотку №4 має місце при значенні подачі зерна $Q = 159,6$ г/хв. та кута деки $\alpha = 34^\circ$. З цього рис. можна також зробити висновок, що допустимі значення аналізованих чинників (при допустимому значенні маси №3 і маси №4) можуть у межах: подача зерна Q від 112 до 167 г/хв. і кута деки від 32° до 37° .

4.9. Рекомендації щодо зниження енергоємності процесів сепарації зернових сумішей

Однією зі складових екологічної безпеки населення і мабуть найважливішою є надмірне, часто невиправдане та необґрунтоване споживання енергії, що призводить до забруднення атмосфери, водних, земельних ресурсів та інших негативних наслідків.

На процеси виробництва та переробки сільськогосподарської продукції споживається значна кількість енергії. У переробній галузі найбільше її витрачається на процеси сушіння. Друге місце у цьому ряду займають процеси сепарації при очищенні зерна від домішків та його сортуванні. Питанням зниження енергоємності при переробці та зберіганні зерна присвячені роботи багатьох вчених. Але більшістю вчених розглядаються питання зниження енергоємності при сушінні, зберіганні та подрібненні зерна, а також при переміщенні повітряних потоків у зернопереробних виробництвах.

Напрями зниження енергоємності процесів та обладнання для сепарації зернових сумішей практично не вивчалися. Традиційно, ще з часів СРСР на перше місце ставили питання продуктивності та якості сепарації зернової суміші незалежно від питомої витрати енергії. Тому задача зниження енергоємності при сепарації зерна є безперечно актуальною.

В пріоритетах реалізації політики енергозбереження в Україні безсумнівно одним з напрямків є зниження енергоємності в сільському господарстві [53]. Найбільш успішно це завдання може бути реалізовано в переробній галузі, а саме при переробці і зберіганні зерна.

Дослідженнями процесів при переробці та зберіганні зерна займалися і продовжують займатися вчені багатьох країн. Особливо багато наукових робіт вчених було опубліковано в другій половині минулого сторіччя. В більшості цих робіт розглядалися питання пов'язані з підвищенням продуктивності, удосконаленням процесів та конструкцій машин, при чому

питання зниження енергоємності при цьому, як правило не розглядались. В останні роки опубліковано багато робіт вчених, присвячених питанням енергоефективності при переробці і зберіганні зерна. Але більшість цих робіт присвячені питанням енергоємності під час сушіння, здрібнення та зберігання зерна [25,26,49,52,55]. При цьому питання безпосередньо енергоефективності процесів поставлені в небагатьох роботах [47,76,77,110].

Питанням зниження енергоємності процесів при сепарації зернових сумішей при цьому приділялось недостатньо уваги тому, що на перший план ставилися задачі підвищення продуктивності та якості сепарації зернових сумішей. І лише в останні роки з'явилися роботи присвячені зниженню енергоємності процесів сепарації зернових сумішей [6,13,15,23]. Аналіз та визначення напрямів зниження енергоємності процесів сепарації зернових сумішей є безперечно актуальним завданням.

Україна завдяки природно-кліматичним умовам була і є великим виробником практично всіх зернових, зернобобових і круп'яних культур. Насіння цих культур є найважливішою сировиною для харчової промисловості. В останні роки все більшого поширення в агропромисловому комплексі України набули такі культури, як ріпак, просо, соя, горох, гірчиця, нут та коноплі, насіння яких широко використовується в переробній та харчовій промисловості.

Зерно і насіння після збирання та попереднього очищення містять деяку кількість насіння бур'янів, зернин інших культур, органічних та мінеральних домішок, а також пошкоджених, дефектних та дрібних зернин основної культури. Наявність у зерні чи насінні цих домішок погіршує їх якість, тому однією з основних умов забезпечення кількісно-якісного зберігання зерна – є своєчасне його очищення. Метою очищення є: забезпечення необхідної якості зерна, а отже якості борошна та крупи, оскільки в деяких випадках, через наявність у зерні насіння отруйних бур'янів воно стає непридатним для використання; покращення умов зберігання зерна; звільнення транспортних засобів від перевезення частини

сміття та завдяки цьому, зниження вартості транспортування зерна; зменшення зараженості зерна, шкідниками хлібних запасів; створення сприятливіших умов сушіння зерна; підвищення якості насіннєвого матеріалу.

Принципи сепарації зернових сумішей ґрунтуються на відмінності фізико-механічних властивостей частинок суміші. Основні фізико-механічні властивості: довжина, ширина, товщина, форма, аеродинамічні властивості, пружність, коефіцієнт тертя, шорсткість, питома вага, колір, електрофізичні властивості. При виборі способу сепарації суміші в першу чергу враховують ознаки, за якими забезпечується найбільш повний поділ вихідної суміші на фракції із заданими показниками якості.

Конструкції сепараторів для розподілу сипких матеріалів можна розділити на три групи.

Перша група – це сепаратори, в яких використовується одна або дві ознаки поділу, на одному робочому органі наприклад, сепаратори, робочим органом яких є решета з круглими отворами, розділяють суміші за однією ознакою шириною, а на решетах з трикутними отворами суміш розділяється за двома ознаками-формою та шириною.

Друга група – це сепаратори, у яких поділ здійснюється послідовно за трьома та більше ознаками. Сепарацію сумішей у сепараторах, які використовують ознаки, поділу послідовно можна назвати сепарацією за комплексом фізико-механічних властивостей. Сепарація по комплексу фізико-механічних властивостей здійснюється, наприклад, у повітряно-решітно-трієрних машинах.

Третя група – сепаратори, у яких під час поділу використовується комбінація властивостей одночасно на одному робочому органі – сепарація за сукупністю фізико-механічних властивостей. До таких сепараторів можна віднести, наприклад, вібраційні сепаратори з фрикційними неперфорованими поверхнями, падді-машини та інші.

Зрозуміло, що для очищення сипких сумішей використовуються

сепаратори всіх трьох груп. Більшість зерноочисних машин, що випускаються промисловістю, традиційно мають пневмо-решітно-триєрні робочі органи, один з них, або комбінацію, залежно від призначення машини.

Суміші, компоненти яких мають розбіжності в розмірах та аеродинамічних властивостях можна назвати звичайними або традиційними. Для сепарації таких сумішей застосовують, як правило зерноочисні машини з пневмо-решітно-триєрними робочими органами.

Поділ сумішей, компоненти яких мають близькі характеристики розмірів та аеродинамічних властивостей, на машинах з пневмо-решітно-триєрними робочими органами виконати практично неможливо, тому такі суміші називають важкороздільними. Для сепарації важкороздільних сумішей застосовують сепаратори, що розділяють суміші за іншими властивостями: фрикційними, пружними, формою, питомою вагою, щільністю, кольором та іншими, найчастіше використовуючи їх у сукупності. Лише при поділі по щільності, шорсткості та кольору не використовується сукупність ознак.

Необхідно відзначити, що не всі фізико-механічні властивості компонентів сумішей достатньо вивчені, інші, можливо, ще й не розкриті.

Для зменшення енергоємності процесів сепарації вченими розглядалася доцільність коливань не решітного робочого органу сепаратора, а зерна на решеті за рахунок пульсуючого повітряного потоку, за допомогою якого зерно струшується на нерухомому решеті. Ідея зниження енергоємності сепарації шляхом надання коливань тільки зерну безперечно заслуговує на увагу, але роботи в цьому напрямку не проводяться і для створення пульсуючого повітряного потоку теж потрібна енергія, і можливо, що енергоємність пристрою для надання руху зерну повітряним потоком не нижча ніж на коливальному решеті. Очевидно, що ідея струшувати лише зерно на решеті можливо дасть змогу знизити енергоємність процесу сепарації, якщо підкидання зерна на решеті буде здійснюватися не енерговитратним пульсуючим повітряним потоком, а наприклад, за

допомогою електростатичного поля.

Для зниження енергоємності процесу сепарації пропонувалось використовувати резонанс. Очевидно, що цей метод зниження енергоємності процесу сепарації та обладнання для його здійснення є перспективним, проте не застосовується у розробці конструкцій зерноочисних машин в основному через розбіжність режимів, які забезпечують якісне очищення зерна та резонансних режимів. Більшістю дослідників питання енергоємності процесу сепарації не вивчалися через незначну масу зерна, що знаходиться в робочому органі сепаратора, порівняно з масою робочого органу, тому що дійсно основна витрата енергії йде на привід в рух самого робочого органу, без якого процес у більшості сепараторів неможливий.

Нами з використанням системного підходу проаналізовано продуктивність, потужність та питомі витрати енергії сучасних зерноочисних машин.

Енергоємність більшості сучасних зерноочисних машин знаходиться в межах від 0,1 до 0,3 кВт ч/т. Найбільшою вона є у спеціальних зерноочисних машин – від 0,3 до 3,5 кВт·ч/т., призначених, як правило для сепарації важкороздільних зернових сумішей.

Тобто енергоємність процесів сепарації на існуючому устаткуванні є досить високою. У середньому вона становить приблизно 0,5 кВт·ч/т. При виробництві зерна в Україні за останні роки до 100 млн.т. витрати електроенергії тільки на попереднє та первинне очищення становитимуть не менше 100 млн. кВт·год.

Особливо висока енергоємність машин спеціального призначення для сепарації важкороздільних зернових сумішей. У багатьох випадках через брак коштів для придбання спеціальних машин, при сепарації важкороздільних зернових сумішей на виробництві використовують багаторазові перепустки сумішей через робочі органи існуючих машин, з пневмо-решітно-триєрними робочими органами, якими забезпечені практично всі агропідприємства, що призводить, крім збільшення

енергоємності, до зниження якості зерна та втрат зерна у відходи.

Проаналізуємо напрями зниження енерговитрат на процеси сепарації зернових сумішей.

На рис. 4.23. представлено розроблений нами алгоритм сепарації зернових сумішей, компоненти яких мають розбіжності в розмірах та аеродинамічних властивостях та густині компонентів суміші.

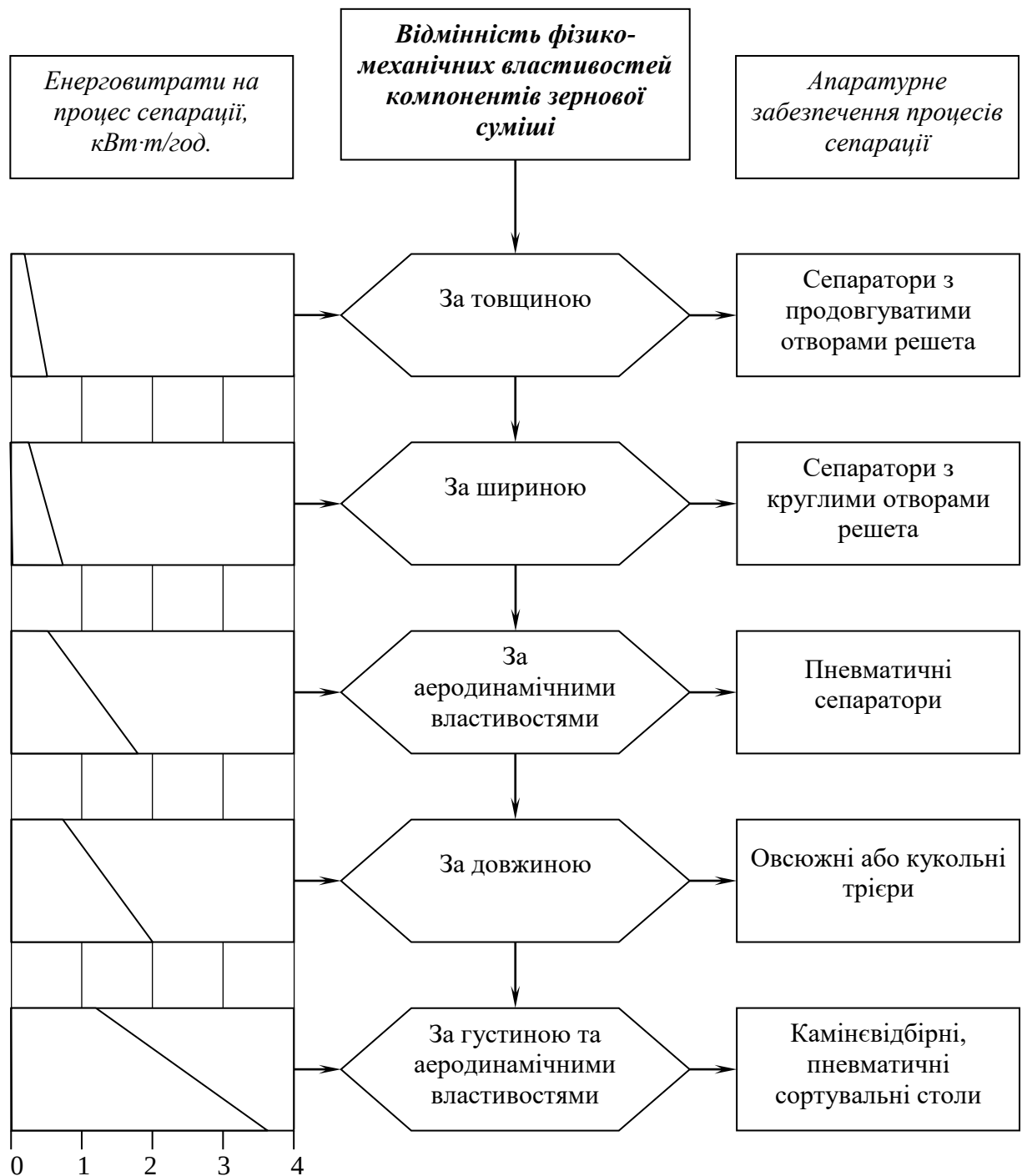


Рисунок 4.23 – Схема алгоритму сепарації зернових сумішей традиційними засобами з діапазонами енерговитрат на процес сепарації

При виборі способу сепарації в першу чергу треба враховувати ознаки, за якими здійснюється найбільш повний поділ суміші. При цьому бажано враховувати кореляцію ознак та енергоємність процесу сепарації

З використанням сучасних засобів сепарації застосування кореляційних ознак, наприклад можливе при виборі першого решета, тобто поділу за товщиною або шириною. І все ж таки з точки зору мінімізації енерговитрат на процес сепарації послідовність проведення сепарації необхідно здійснювати таким чином: сепарацію за розмірами слід починати з використанням решіт з продовгуватими отворами, тобто за товщиною насіння. Це можна пояснити тим, що інтенсивність коливань решітного стану при сепарації на решетах з продовгуватими отворами може бути нижча за інтенсивність коливань при сепарації на решетах з круглими отворами, тому що для проходу частинки крізь продовгуватий отвір їй достатньо повернутися на бік. Тобто в першому випадку зерно необхідно підкидати на половину його ширини, у другому на половину довжини. Зрозуміло, що інтенсивність коливань у другому випадку має бути більшою, а отже, на цей процес більші й енерговитрати. Як правило, потім необхідно використовувати сепарацію за шириною одночасно з сепарацією за аеродинамічними властивостями на комбінованих машинах. Потім сепарацію за довжиною (трієри) і далі аеродинамічними властивостями та щільністю – камневідбірні машини та пневматичні сортувальні столи. Алгоритм сепарації важкороздільних зернових сумішей представлено на рис. 4.24.

В даному алгоритмі пропонуються використовувати сепаратори розроблені з участю автора цієї роботи. Енергоємність процесів сепарації на деяких з них наближається до нуля, це гравітаційні фрикційні та ударні сепаратори. Якщо, наприклад, завантаження в бункер такого сепаратора здійснювати вручну, а при сепарації насіння деяких овочевих культур, лікарських, квіткових рослин об'єми купи незначні, на практиці це так і відбувається, то витрати електроенергії дійсно нульові. Сепарацію важкороздільних зернових сумішей теж, як правило, здійснюють спочатку за

першим алгоритмом, для видалення легких, малих та великих домішків, якщо такі є в суміші, а вони зазвичай є. Далі для видалення вже важковідділяємих домішків, з огляду на мінімізацію витрат енергії на процес сепарації, сепарацію слід здійснювати на гравітаційних фрикційних сепараторах за формою та коефіцієнтами тертя, або гравітаційних ударних сепараторах за пружними властивостями, формою та коефіцієнтом тертя.



Рисунок 4.24 – Схема алгоритму сепарації важкороздільних зернових сумішей з діапазонами енерговитрат на процес сепарації

Далі на гіраційних сепараторах за аеродинамічними властивостями, розмірами, коефіцієнтами тертя та формою. Після цього на вібраційних

сепараторах з профілями найменшого опору за формою та коефіцієнтами тертя і на останок на віброфрикційних сепараторах за пружними властивостями, коефіцієнтами тертя та формою.

На особливе місце в ряду обладнання для сепарації сипких сумішей можна поставити сепаратори, що здійснюють сепарацію за кольором частинок сумішей. Ці сепаратори нещодавно з'явилися в продажу на промисловому ринку України, вартість їх на порядок вища ніж традиційних сепараторів, обслуговування дуже складне, але за якістю сепарації зарекомендували вони себе добре. Можна їх включити в кінець другого алгоритму, але на наш погляд питання використання сепараторів за кольором частинок заслуговує окремого дослідження, очевидно розвиток їх буде відбуватися так стрімко, що знадобиться розробка спеціального алгоритму для сепарації сумішей за кольором.

На даний час, найбільш ефективно очищення зерна від важко відокремлюваних домішків здійснюється на розроблених за участю авторів гравітаційних багатоярусних ударних сепараторах, в яких енергія на процес сепарації зовсім не витрачається. Рух суміші в робочому органі сепаратора здійснюється за рахунок сили тяжіння та пружних властивостей зерна.

Розроблений сепаратор ефективно застосовувати для очищення насіння дрібнонасінневих культур, таких як ріпак, гірчиця, просо, коноплі, овочеві, трави лікарські рослини тощо. У деяких випадках його ефективно використовувати навіть для сепарації відходів у яких важко відокремлюваних домішків більше 50%.

Висновки за розділом 4

1. Варіаційні криві розмірних характеристик, коефіцієнтів тертя, коефіцієнтів відновлення швидкості під час удару граничних кутів підйому та траєкторій руху по віброфрикційним поверхням насіння проса та

важковідокремлюваних бур'янів курячого проса та щетинника сизого свідчить про неможливість поділу насіннєвих сумішей за розмірами та коефіцієнтами тертя. Відокремлення насіння проса від важковідокремлюваних домішок можливе за граничними кутами їх підйому аботраєкторіями руху по похилій фрікційній вібруючій поверхні та коефіцієнтами відновлення швидкості під час удару об відбивну поверхню. Найкращих результатів сепарації слід очікувати на робочих поверхнях облицьованих фанерою технічною.

2. Результати проведених досліджень дальності відскоку насіння проса та засмічувачів після удару об похилу відбивну поверхню показують, що можна очистити насіння проса від насіння мишію та курячого проса за рахунок розбіжностей у пружних властивостях компонентів суміші та ударних взаємодій зерна з похилою поверхнею після удару.

3. На підставі дослідження процесу виділення насіння бур'янів мишію та курячого проса з насіннєвої суміші проса на багатоярусному ударному сепараторі визначені раціональні параметри сепарації за допомогою багатофакторного експерименту та аналізу двомірних перетинів поверхонь відгуку, повздовжній кут нахилу робочого органу $3,6^0$ - $3,8^0$, подача зерна на робочій орган $47,5$ - $51,7$ кг/год., поперечний кут нахилу – $34,5^0$ - 36^0 .

Вихід очищеної фракції при цьому становить – 70% у тому числі 43% 1 класу.

4. За результатами аналізу двовимірних перерізів поверхонь відгуку отримані раціональні параметри сепарації насіння проса на гравітаційному ударному сепараторі з поперечною подачею за умови досягнення максимальної маси зерна в ємностях №3 і №4, а саме кут деки $\alpha = 34,2^0$ (фактор х 1), подача $Q=9.6$ кг/год. (фактор х 2), кут живільника дорівнює $32,6^0$ (фактор х 3).

5. Однією з найважливіших складових екологічної безпеки населення є надмірне, невиправдане і необґрунтоване споживання енергії. У переробній галузі сільськогосподарського виробництва найбільше її споживання

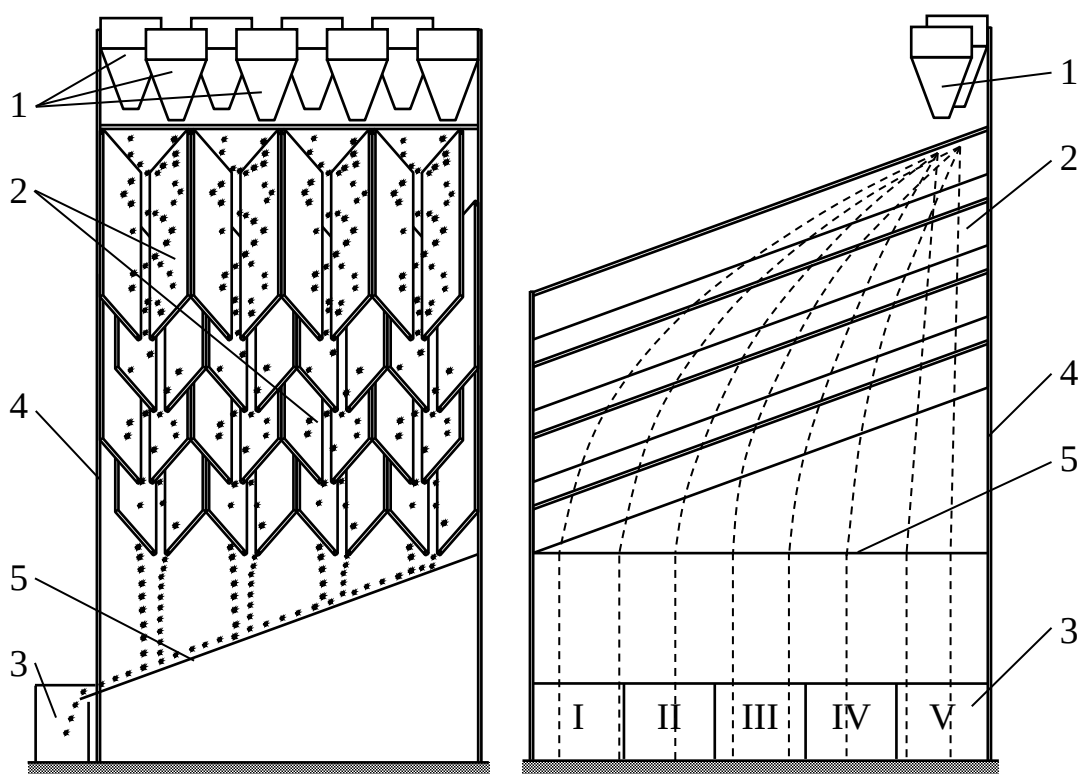
витрачається на сушіння та очищення зерна. Розглянуті напрями зниження енергоємності процесів сепарації зернових сумішей із застосуванням існуючих та розроблених способів та засобів сепарації. Запропоновано алгоритм мінімізації енерговитрат при сепарації зерна на сучасних зерноочисних машинах та алгоритм мінімізації енерговитрат при сепарації важкороздільних зернових сумішей.

РОЗДІЛ 5

ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ УДОСКОНАЛЕНОГО ГРАВІТАЦІЙНОГО СЕПАРАТОРА ДЛЯ СЕПАРАЦІЇ НАСІННЯ ПРОСА

5.1. Виробничі випробування гравітаційного сепаратора для очищення насіння проса

Для проведення виробничих випробувань був сконструйований та виготовлений удосконалений експериментальний зразок гравітаційного сепаратора, схема якого представлена на рис. 5.1, а загальний вигляд на рис. 5.2.



1 – бункер; 2 – ударні поверхні; 3 – корпус сепаратора; 4 – скатна дошка;
5 – приймачі продуктів сепарації

Рисунок 5.1 – Принципіальна схема гравітаційного багатоярусного ударного сепаратора



Рисунок 5.2 – Загальний вигляд гравітаційного багатоярусного ударного сепаратора

Конструктивною основою для експериментального зразка сепаратора стали лабораторні гравітаційні сепаратори описані в третьому розділі. По суті експериментальний зразок є конструктивним об'єднанням двох модулів різних сепараторів в одному, шляхом удосконалення та невеличкої переналадки живильного пристрою, установки поздовжнього кута нахилу, та збільшення модулів сепарації до чотирьох. За першою схемою роботи гравітаційний сепаратор працює, як звичайний багатоярусний ударний сепаратор зі збільшеною продуктивністю. Як правило вже за один пропуск насіння проса на сепараторі при роботі в ударному режимі вдається довести насіннєвий матеріал до високої кондиції. Якщо ж за один пропуск цього

зробити не вдається сепаратор переналагоджують в ударно-фрикційний режим роботи для цього змінюється висота та кут нахилу живильних лотків, а повздовжній кут нахилу робочих поверхонь встановлюється рівним нулю.

Під об'єднаними модулями сепаратора встановлена скатна поверхня з нахилом в напрямку перпендикулярному поздовжньої осі сепаратора і з цієї бокової сторони встановлені чотири: приймачі фракції відходів, проміжної фракції та фракції очищеного зерна. В четвертий та п'ятий торцевий приймач надходить найвища фракція очищеного зерна. При сепарації дуже складних засмічених сумішей рекомендується збільшити кількість приймачів в два рази і варіювати якістю шляхом об'єднання певних фракцій.

Оскільки робота сепаратора практично безшумна, проводити спеціальні заходи зі зниження рівня звукового навантаження немає необхідності.

Виробничі випробування гравітаційного сепаратора насіння проса з розробленими робочими органами проводились на базі СФГ «Калина» Чугуївського району Харківської області. Метою випробувань була перевірка проведених теоретичних та експериментальних досліджень, а також ефективності застосування розробленого сепаратора в виробничих умовах на сепарації насіння проса.

Виробничі випробування проведені з липня 2024 р. по грудень 2024 р. проводилось додаткова обробка зернового матеріалу проса сорту «Харківське – 31», що пройшло попередню обробку, сушку та основну обробку, засміченістю 5,6% насінням щетинника сизого та курячого проса.

Режим роботи сепаратора відповідав оптимальним значенням, що знайдені за результатами проведених досліджень (розділ 4).

В таблиці 5.1 представлені результати сепарації та сортування насіння проса на багатоярусному ударному сепараторі

Таблиця 5.1 – Результати сепарації та сортування насіння проса

Найменування	Номер приймального лотка				
	1	2	3	4	5
Розподіл маси по лотках, кг	5,1	12,2	15,1	12,7	4,9
Розподіл маси по лотках, %	10,2	24,4	30,2	25,4	9,8
Розподіл маси по лотках бур'янів, %	79,6	18,5	1,9	-	-
Розподіл бур'янів по лотках, шт/кг	255800	71500	6100	-	-
Маса 1000 зернин проса	6,1	6,5	6,7	6,9	6,9
Клас зерна	відхід	на доробку	2кл	I кл посівне	I кл посівне

Як видно з таблиці 5.1, розподіл маси зерна проса здійснено по п'яти приймачах сепаратора.

При цьому в 4 та 5 приймачі потрапляє 35,2% зерна проса повністю очищеного від насіння важковідокремлюваних бур'янів. В третій приймач потрапляє 30,2% насіння Iго класу, яке можна направляти на переробку в крупу, або після отримання крупи переробляти в борошно на пристрої запропонованому в [73]. В другому приймачі опинилось 24,4% загальної маси зерна засміченістю 18,5%, з якого можна при повторному пропуску виділити 33% зерна 2 класу. В 1 приймач потрапляє 10,2% суміші від загальної маси – це 79,6% бур'янів. З таблиці також видно, що одночасно з очищенням проходить і сортування зерна по масі 1000 зернин. Очищене насіння 4 і 5 приймачів має більшу масу 1000 зернин і його рекомендується використовувати для посіву, бо відомо, що з насіння з більшою масою 1000 зернин можна отримати більший урожай. Вміст першого приймача можна рекомендувати використати на комбікорми, з використанням запропонованих нами здрібнювачів [44,45].

При продуктивності 300 кг/год вихід кондиційного зерна складав 65,4%, з них 35,2% посівного насіння. Так як при заданому режимі роботи кути нахилу робочого органу більші за кути тертя насіння – умова самоочистки робочої поверхні виконана і засмічення дек будь-якими домішками не спостерігалось. Пошкодженого насіння, а також половинок зерна проса в цільовій фракції також не виявлено.

Завдяки простій конструкції всі робочі органи в процесі роботи сепаратора доступні і легкі в обслуговуванні.

За час виконання робіт відмов машини в зв'язку з виходом зі строю будь-яких вузлів чи елементів конструкції не було. Помітного зносу робочих органів – робочих поверхонь, не зафіксовано.

Економічний ефект від застосування вібросепаратора на сортуванні насіння проса СФГ «Калина» склав 20960 грн.

На основі отриманих результатів можна зробити висновок про доцільність застосування гравітаційного сепаратора з розробленими робочими органами для додаткової обробки зерна в технологічних лініях по підготовці насіннєвого матеріалу.

Оцінюючи ефективність розробки, підприємство «Калина» рекомендувало продовжити дослідження з метою збільшення продуктивності сепарації. Тут слід зазначити, що в запропонованому сепараторі далеко не вичерпаний ефективний та перевірений практикою метод підвищення продуктивності за рахунок збільшення числа робочих органів. Для сепаратора з найпростішою робочою поверхнею це легко виконати, розташувавши яруси в пакети, наприклад, концентрично і один над другим. Таких пакетів, жорстко з'єднаних між собою дек, в робочому просторі (блоці) можна розташувати достатньо багато, розмістивши їх в ряди.

В перспективі також видно, що для збільшення продуктивності можна встановлювати два або чотири блоки робочих органів симетрично живильників та один над одним.

Але одночасно з тим на перший план висувається, задача, що стала вже традиційною [13], забезпечення рівномірної подачі зернового матеріалу на кожний робочий орган. Слід зазначити, що розробка конструкції завантажувального пристрою, що здатен забезпечити точне дозування зерна між робочими органами, є окремою темою дослідження, що потребує наукового і технічного обґрунтування. В програму цієї роботи рішення такої задачі не входило.

5.2. Техніко-економічна ефективність впровадження гравітаційного сепаратора для очищення насіння проса

Виготовлення гравітаційного сепаратора можливо в умовах навчальної або виробничої майстерні. З метою визначення економічної доцільності створення дослідного зразка виконано розрахунок собівартості матеріалів.

Вартість матеріалів визначається за формулою:

$$C_m = \sum(Q_i \cdot P_i),$$

де C_m – вартість матеріалів, грн; Q_i – кількість матеріалу; P_i – ціна одиниці матеріалу.

Дані для розрахунку вартості сепаратора приведені в таблиці 5.2.

Таблиця 5.2 – Кошторис матеріалів для виготовлення сепаратора

№	Найменування матеріалу	Одиниця	Кількість	Ціна, грн	Сума, грн
1	Сталь листова 0,8 мм	м ²	5	280	1400
2	Фанера технічна 10 мм	м ²	10	450	4500
3	Труба сталеві 20×40 мм	м.п.	10	140	1400
4	Труба сталеві 15×15 мм	м.п.	2	90	180
5	Куточок металевий 30×30 мм	м.п.	4	110	440
6	Шина металеві 5×30 мм	м.п.	4	85	340
7	Брус дерев'яний 20×30 мм	м.п.	20	55	1100
8	Вироби кріплення	кг	3	120	360

Загальна вартість матеріалів становить 9720 грн.

З урахуванням трудових витрат, накладних витрат та витрат на енергоспоживання було визначено повну собівартість виготовлення експериментального зразка.

Матеріали – 9720 грн

Трудові витрати (40%) – 388 грн

Накладні витрати (25%) – 2430 грн

Повна собівартість сепаратора становить орієнтовно 16000 грн.

Вихідні дані для проведення оцінки техніко-економічної ефективності представлені в таблиці 5.3

Таблиця 5.3 – Вихідні дані для розрахунку техніко-економічної ефективності впровадження гравітаційного сепаратора

Показники	Сепаратор	
	Серійні CAD-1	Розроблений
1	2	3
1. Встановлена потужність електродвигунів, кВт	0,55	0,0
2. Коефіцієнт використання робочого часу	0,74	0,74
3. Кількість обслуговуючого персоналу, роб	1	1
4. Тарифний розряд	4	4
5. Тарифна ставка, грн/год	26,23	26,23
6. Вартість сепаратора, грн	48000	16000
7. Норма амортизаційних відчислень, %	15	15
8. Норма відчислень технічного обслуговування, %	6,5	6,5
9. Тривалість зміни, год	7	7
10. Річне завантаження роботи сепаратора, год	1680	1680
11. Продуктивність сепаратора на просі, кг/год	350	300

Для визначення техніко-економічної ефективності необхідно провести порівняльний аналіз експлуатації сепараторів: серійного САД-1 та сепаратора з розробленими робочими органами.

З отриманих даних слід оцінити доцільність впровадження сепаратора з розробленими робочими органами у виробництво. Насамперед здійснюється розрахунок абсолютних і питомих капіталовкладень для обох варіантів. Капіталовкладеннями в сепаратори є їх балансові вартості.

Балансову вартість сепараторів (B) (вартість абсолютних капіталовкладень) (K) для порівнюваних варіантів визначають з наступною формулою:

$$K = C \cdot \eta \text{ грн.}, \quad (5.1)$$

де: C – вартість сепаратора, *грн.*;

η – коефіцієнт, що враховує витрати на транспортування та монтаж сепаратора ($\eta = 1,25$)

$$K_0 = 48000 \cdot 1,25 = 60000,0 \text{ грн.}$$

$$K_1 = 16000 \cdot 1,25 = 20000,0 \text{ грн.}$$

При визначенні економічної ефективності важливе значення має

різниця у капітальних витратах серійного сепаратора (K_0) та сепаратора з розробленими робочими органами (K_1). Якщо капітальні вкладення сепаратор з розробленими робочими органами менше, ніж у серійний, то споживач отримує економію на капіталовкладеннях.

Розрахунок проводиться за такою формулою:

$$\Delta K = K_0 - K_1 \text{ грн.}, \quad (5.2)$$

де: K_0 – капітальні вкладення в серійний сепаратор, *грн.*;

K_1 – капітальні вкладення в сепаратор з розробленими робітниками органами, *грн.*

Розрахунок матиме такий вигляд:

$$\Delta K = 60000,0 - 20000,0 = 40000,0 \text{ грн.}$$

При визначенні економічної ефективності має значення величина капітальних витрат, що припадають на одиницю виробітку. Ця величина є питомими капіталовкладеннями ($K_{y\partial}$), які визначаються для двох варіантів за формулою:

$$K_{y\partial} = K / W \text{ грн./т}, \quad (5.3)$$

де: K – капітальні вкладення в сепаратор;

W – річне вироблення сепаратора, *кг*.

Річний виробіток сепаратора (W_{Γ}) розраховується за формулою:

$$W_{\Gamma} = W \cdot k_{\text{вр}} \cdot T_{\text{м}}, \quad (5.4)$$

де: W – годинна продуктивність, *кг/год.*;

$k_{\text{вр}}$ – коефіцієнт використання часу зміни;

T – річна тривалість роботи, *годинника*.

$$W_{\Gamma 0} = 300 \cdot 0,74 \cdot 1680 = 372960 \text{ кг або } 372,96 \text{ т}$$

$$W_{\Gamma 1} = 300 \cdot 0,74 \cdot 1680 = 372960 \text{ кг або } 372,96 \text{ т}$$

Виходячи з цього, питомі капіталовкладення дорівнюватимуть:

$$K_{\text{ндо}} = \frac{60000,0}{372960} = 0,161 \text{ грн./кг}$$

$$K_{\text{нol}} = \frac{20000,0}{372960} = 0,054 \text{ грн./кг}$$

Наступним етапом проводиться визначення абсолютної величини

експлуатаційних витрат при використанні серійного сепаратора (I_0) та сепаратора з розробленими робочими органами (I_1) за такою формулою:

$$I = Z_{\Pi} + E_E + T_O + A_M \text{ грн.}, \quad (5.5)$$

де: Z_{Π} – заробітна плата обслуговуючого персоналу, грн.;

E_E – вартість електроенергії, грн.;

T_O – витрати на технічне обслуговування, грн.;

A_M – амортизаційні відрахування, грн.

Заробітна плата обслуговуючого персоналу (Z_{Π}):

$$Z_{\Pi} = N \cdot Z \cdot k_e \cdot T \cdot E_{CB} \text{ грн.}, \quad (5.6)$$

де: N – кількість обслуговуючого персоналу, *чол*;

Z – тарифна ставка, грн. /*год*.;

k_e – коефіцієнт підвищення розцінок за виконання плану, ($k_e = 1,4$);

T – річна тривалість роботи, *год*.;

E_{CB} – ставка нарахування єдиного соціального внеску, виражена десятковим дробом ($E_{CB} = 1,3718$).

$$Z_{\Pi 0} = 1 \cdot 26,23 \cdot 1,4 \cdot 1680 \cdot 1,3718 = 846304,03 \text{ грн.}$$

$$Z_{\Pi 1} = 1 \cdot 26,23 \cdot 1,4 \cdot 1680 \cdot 1,3718 = 846304,03 \text{ грн.}$$

Розрахунок вартості електроенергії (E_E) виглядатиме так:

$$E_e = M_e \cdot T \cdot k_{ep} \cdot T_e \text{ грн.}, \quad (5.7)$$

де: M_e – встановлена потужність електродвигунів, *кВт*;

T – річна тривалість роботи, *год*.;

k_{ep} – коефіцієнт використання часу зміни;

T_e – тариф на електроенергію, грн. / *кВт. год*. ($T_e = 8,64$).

$$E_{e0} = 0,55 \cdot 1680 \cdot 0,74 \cdot 8,64 = 5907,68 \text{ грн.}$$

$$E_{e1} = 0 \cdot 1680 \cdot 0,74 \cdot 8,64 = 0,0 \text{ грн.}$$

Відрахування на технічне обслуговування (T_O):

$$T_O = \frac{B \cdot H}{100} \text{ грн.}, \quad (5.8)$$

де: H – норма відрахувань технічне обслуговування, %;

B – балансова вартість сепаратора, грн.

$$T_{00} = \frac{60000,0 \cdot 6,5}{100} = 3900 \text{ грн.}$$

$$T_{01} = \frac{20000,0 \cdot 6,5}{100} = 1300,00 \text{ грн.}$$

Амортизаційні відрахування (A_m) розраховуються наступним чином:

$$A_m = \frac{B \cdot a}{100} \text{ грн.,} \quad (5.9)$$

де: a – норма амортизаційних відрахувань, %;

B – балансова вартість сепаратора, грн.

$$A_{M0} = \frac{60000,0 \cdot 15,0}{100} = 9000,0 \text{ грн.}$$

$$A_{M1} = \frac{20000,0 \cdot 15,0}{100} = 3000,0 \text{ грн.}$$

Виходячи з проведених розрахунків, експлуатаційні витрати при використанні серійного сепаратора (I_0) та сепаратора з розробленими робочими органами (I_1) будуть рівні відповідно:

$$I_0 = 846304,03 + 5907,68 + 3900 + 9000,0 = 865111,71 \text{ грн.}$$

$$I_1 = 846304,03 + 0,0 + 1300,0 + 3000,0 = 850604,03 \text{ грн.}$$

Річна економія експлуатаційних витрат (E_p) визначається як різниця витрат, що припадають на один кілограм обробленого матеріалу, помножена на річний обсяг роботи сепаратора з розробленими робочими органами:

$$E_p = (I_0 - I_1) \cdot W_{p1} \text{ грн.,} \quad (5.10)$$

де: I_0 та I_1 – експлуатаційні витрати сепаратора з серійними та розробленими робочими органами з розрахунку на один кілограм обробленого матеріалу, грн.;

W_{p1} – річне вироблення сепаратора з розробленими робочими органами, кг

$$E_p = \left(\frac{865111,71}{372960,0} - \frac{850604,03}{372960,0} \right) \cdot 372960,0 = (2,32 - 2,28) \cdot 372960 = 14918,4 \text{ грн.}$$

Продуктивність праці (Π_{Π}) розраховується за такою формулою:

$$\Pi_{\Pi} = \frac{W_p}{N \cdot T} \text{ кг/чел.год.,} \quad (5.11)$$

де: W_p – річне вироблення сепаратора, кг;

N – кількість обслуговуючого персоналу, чел;

T – річна тривалість роботи, год.

$$П_{п0} = \frac{372960,0}{1 \cdot 1680} = 222,0 \text{ кг/чел.час.}$$

Трудомісткість праці (T_{II}) є зворотною до продуктивності праці величиною і розраховується за формулою :

$$T_{II} = \frac{N \cdot T}{W_p} \text{ чел.час./кг} \quad (5.12)$$

$$T_{II0} = \frac{1 \cdot 1680}{372960} = 0,0045 \text{ чел.час./кг}$$

$$П_{п1} = \frac{372960}{1 \cdot 1680} = 222,0 \text{ кг/чел.час.}$$

$$T_{II1} = \frac{1 \cdot 1680}{372960,0} = 0,0045 \text{ чел.час./кг}$$

Електроємність (E_{ϵ}) розраховується за формулою:

$$E_{\epsilon} = \frac{Q_{E\epsilon}}{W_p} \text{ кВт.час./т}, \quad (5.13)$$

де: $Q_{E\epsilon}$ – витрати електроенергії, кВт. год.;

W_p – річне вироблення сепаратора, т.

$$E_{\epsilon 0} = \frac{924}{372,96} = 2,48 \text{ кВт.час./т.}$$

$$E_{\epsilon} = \frac{0}{372,96} = 0,0 \text{ кВт.час./т.}$$

Річний економічний ефект від впровадження сепаратора з розробленими робочими органами визначається як різниця наведених витрат та твори річного виробітку сепаратора з розробленими робочими органами:

$$E_p = [(I_0 + E_n \cdot k_{y\partial 0}) - (I_1 + E_n \cdot k_{y\partial 1})] W_{p1} \text{ грн.}, \quad (5.14)$$

де: $k_{y\partial 0}$ та $k_{y\partial 1}$ – наведені витрати на сепаратори відповідно при використанні серійних та розроблених робочих органів, у розрахунку на одиницю роботи, грн.;

W_{p1} – річне вироблення сепаратора з розробленими робітниками органами, од. роботи;

I_0 та I_1 – експлуатаційні витрати сепаратора з серійними та розробленими робочими органами для одного кг. обробленого матеріалу;

$E_n = 0,15$ – нормативний коефіцієнт ефективності капіталовкладень.

$$E_p = [(1,72 + 0,15 \cdot 0,161) - (1,68 + 0,15 \cdot 0,053)] \cdot 372960 = 20960,3 \text{ грн.}$$

Результати проведених вище розрахунків подано у таблиці 5.4.

Таблиця 5.4 – Техніко-економічна ефективність застосування сепаратора з розробленими робочими органами

№ п.п	Показники	Сепаратор		Відхилення
		серійний САД-1	розроблений	
1	2	3	4	5
1	Річний виробіток, кг	504000	504000	0,0
2	Експлуатаційні витрати, грн./ кг	1,72	1,68	97,6
3	Річна економія	-	14918,4	-
4	Продуктивність праці, кг/чол.год.	222	222	
5	Трудомісткість праці, чол. год/т	3,33	3,33	50,0
6	Електроємність, кВт. год. / т	2,48	0	
7	Питомі капіталовкладення, грн. / кг	0,161	0,053	32,9
8	Річний економічний ефект, грн.	-	20960,3	-

Здійснена оцінка техніко-економічної ефективності, а також доцільність впровадження вібраційного сепаратора з використанням малогабаритної деки з криволінійним профілем дає можливість упевнено стверджувати про наступне. При використанні сепаратора з розробленими робочими органами річний виробіток не зміниться але при цьому покращиться якість сепарування, експлуатаційні витрати незначно скоротяться. Продуктивність праці трудомісткість не зміниться. Річний економічний ефект від впровадження розробленого сепаратора становитиме 20960,3 грн. на одну машину. Виходячи з вищевикладеного, можна стверджувати про ефективність, а відтак доцільність впровадження сепаратора з використанням розроблених робочих органів.

Висновки за розділом 5

1. Розрахунок економічної ефективності підтверджує доцільність застосування сепаратора для підготовки насіннєвого матеріалу проса –

річний економічний ефект застосування сепаратора складе 20960,3 грн.

2. Є перспектива підвищення ефективності роботи сепаратора за рахунок збільшення та об'єднання робочих органів (дек) у пакети або встановлення додаткового блоку робочих органів. Пакети рекомендується виконувати знімними для використання машини для різних зернових сумішей.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ ТА ПРОПОЗИЦІЇ

В дисертації дано теоретичне узагальнення і нові рішення наукового завдання, яке полягає в розроблених математичних моделях руху зерна по гравітаційним відбивним поверхням, які враховують фізико-механічні властивості зерна та параметри сепарації.

Основні наукові і практичні результати полягають в наступному.

1. Проведеним аналізом науково-технічної інформації встановлено, що основною стратегією створення потужної сировинної та продовольчої бази України є підвищення якості посівного матеріалу. Існуючі конструкції насіннеочисних машин для підготовки насіння проса не забезпечують отримання насінневого матеріалу високих посівних кондицій. Тому для отримання насіння високих посівних кондицій необхідно для додаткової обробки вводити машини, які працюють на основі сукупності ознак розділення – пружних, фрикційних та форми.

2. В результаті проведених теоретичних досліджень ударної взаємодії кулеподібного тіла з нахиленою нерухомою поверхнею встановлено, що її обертання припиняється протягом першої фази удару і в межах реальних значень частот обертання частинки при падінні на нахилу площину, коефіцієнтів тертя та кутів нахилу площини, обертання частинки не дає істотного впливу на відбивання частинки від площини і їм можна знехтувати.

3. Встановлено, що врахування позиційного тертя в моделі удару пружних тіл суттєво впливає на розраховані параметри удару, воно зменшує максимум зближення центрів мас тіл і збільшує максимум сили удару та тривалість динамічної взаємодії, а також ці параметри суттєво залежать від форми граничних поверхонь тіл в області їх контакту.

4. В результаті проведених теоретичних досліджень після ударного руху частинки після удару з похилою площиною встановлена можливість сепарації частинок на похилій площині з подачею суміші в поперечному напрямку з ударом об площину, за рахунок використання різниці у висоті

траєкторій їхнього руху та в залежності від моменту інерції частинок.

5. Запропоновані інноваційні конструктивно прості прилади для визначення коефіцієнтів статичного та динамічного зовнішнього тертя для кожного окремого зерна виборки з продуктивністю в багато разів більшою ніж у відомих, а також прилади для визначення граничних кутів підйому та траєкторії руху зерна по вібраційним непорфованим поверхням.

6. Встановлено, що найбільші відмінності ознак серед фізико-механічних властивостей насіння проса і важковідокремлюваних бур'янів щетинника сизого та курячого проса спостерігаються в їхній пружності, тому сепарацію насінневих сумішей проса та важковідокремлюваних домішок слід здійснювати на відбивних поверхнях з багатократним ударом, які забезпечують більш стійкі траєкторії руху частинок з різною пружністю в робочому органі сепаратора і підвищенню за рахунок цього якості сепарації.

7. Комплексним аналізом результатів теоретичних та експериментальних досліджень, проведених багатфакторних експериментів визначені взаємозв'язки основних конструктивних параметрів сепаратора для двох варіантів його компоновки у вигляді рівнянь регресії і знайдені раціональні значення режимів його роботи за результатами аналізу двовимірних перерізів поверхонь відгуку для багатоярусного ударного сепаратора за умови максимального виходу очищеної фракції 70%, в тому числі 43% 1 класу, ці параметри такі: поздовжній кут нахилу робочого органу – $3,6^{\circ}$ - $3,8^{\circ}$, подача зерна – 47,5-51,7 кг/год, поперечний кут нахилу – $34,5^{\circ}$ - 36° .

Для компоновки робочого органу з поперечною подачею при максимальному виході очищеної фракції 73%, в тому числі 43% 1 класу, параметри такі: поперечний кут нахилу – $34,2^{\circ}$, кут нахилу живильника – $32,6^{\circ}$, подача – 9,6 кг/год.

8. Запропоновані рекомендації щодо зниження енергоємності процесів сепарації зернових сумішей із застосуванням існуючих та розроблених способів та засобів сепарації та розроблено алгоритм мінімізації

енерговитрат при сепарації зерна на сучасних зерноочисних машинах та алгоритм мінімізації енерговитрат при сепарації важкороздільних зернових сумішей.

9. Виробничими випробування розробленого гравітаційного багатоярусного сепаратора з ударного сепаратора в умовах СФГ «Калина» Чугуївського району Харківської області встановлено, що сепаратор простий в обслуговуванні, надійний і безпечний в експлуатації і забезпечує за один прохід підготовку кондиційного насіння зерна проса. Передбачуваний річний економічний ефект від випробування гравітаційного багатоярусного ударного сепаратора складає 20960,3 грн на один сепаратор.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Алієв Елічин Бахтияр огли. Фізико-математичні моделі процесів прецизійної сепарації насіннєвого матеріалу соняшнику: *монографія*. Запоріжжя: СТАТУС, 2019. 196 с.
2. Алієв Ельчин Бахтияр Огли. Механіко-технологічні основи процесу прецизійної сепарації насіннєвого матеріалу соняшнику: Дисс. докт. техн. наук: 05. 05. 11/ - Харк. нац. техн. ун-т с.г. ім. П. Василенка. - Харків, 2020. – 530 с.
3. Алієв Ельчин Бахтияр огли. Механіко-технологічні основи процесу прецизійної сепарації насіннєвого матеріалу соняшнику: автореф. дис. докт.техн.наук: 05.05.11. Харків, 2020. 40 с.
4. Бакум М. В. До обґрунтування ефективності використання пневматичного сепаратора з нахиленим повітряним каналом для попередньої сепарації насіннєвих сумішей петрушки/ М.В. Бакум, М.М. Крекот, М.М. Абдуєв, О.А. Шептур, О.С. Вотченко, М.В. Могільний //Вісник ХНТУСГ ім. Петра Василенка. Харків-2010. Вип.103 С. 267-274.
5. Бакум М.В., Мацієнко В.С., Кісь В.М. До обґрунтування способів очищення насіння проса від насіння бур'янів. Вісник ХНТУСГ ім.П.Василенка – Харків, ХНТУСГ, 2016 Вип. 173: Механізація с.г. виробництва. – с. 110-118.
6. Богомолів О. В., Михайлов В. М., Завгородній О. І., Гурський П. В., Богомолів О. О., Бойко Є. В. Шляхи зниження енергоємності процесів сепарації зернових сумішей // Прогресивні техніка та технології харч. вир-в ресторан. госп-ва і торгівлі : збірник наук. пр. - Харків : ДБТУ, 2024. - Вип. 1 (35). - С. 165-179.
7. Богомолів О.В. До питання сепарації зернових сумішей за сукупністю пружних та аеродинамічних властивостей / О.В. Богомолів, О.І. Завгородній, В.П. Ольшанський, О.О. Богомолів // Сучасні напрями технології та механізації процесів переробних та харчових виробництв: Вісник ХНТУСГ. –

Харків, 2019. – Вип. № 207. – С. 5–12.

8. Богомолов О.В. До розробки алгоритму аналізу та сепарації зернових сумішей / О.В. Богомолов, В.М. Кісь, І.М. Лук'янов, В.В. Акіншин, О.О. Богомолов // Вісник ХНТУСГ. – Харків, 2019. – С. 60–66.

9. Богомолов О.В. Елементи теорії ударних сепараторів зернових сумішей / О.В. Богомолов // Вісник ДонДУЕТ. Серія «Технічні науки», 2002. № 2(14). – С. 67–80.

10. Богомолов О.В. Удосконалення конструкції гравітаційного багатоярусного ударного сепаратора / О.В. Богомолов, М.В. Брагінець, А.Р. Мазунов, Е.М. Науменко, О.О. Богомолов, В.П. Богомолова // Сучасні напрями технології та механізації процесів переробних та харчових виробництв: Вісник ХНТУСГ. – Харків, – 2019. – Вип. № 207. – С. 75–81.

11. Богомолов О.В., Завгородній О.І., Богомолов О.О., Бойко Є.В., Науменко Є.М., Шуваєв М.С. До питання удосконалення компоновки схеми приводу віброфрикційного сепаратора насінєвих сумішей // Прогресивні техніка та технології харчових виробництв, ресторанного господарства та торгівлі. Харків : ДБТУ, 2024. Вип. 2 (36).

12. Богомолов О.В., Михайлов В.М., Богомолов О.О., Бойко Е.В. До питання обґрунтування способу визначення коефіцієнтів тертя кочення та приладу для його здійснення // Прогресивні техніка та технології харчових виробництв, ресторанного господарства та торгівлі. Харків : ДБТУ, 2025. Вип. 3 (37). С.174-180.

13. Богомолов О.В., Михайлов В.М., Богомолов О.О., Бойко Є.В., Панов В.О., Бочарніков І.О. До питання сепарації зернових сумішей без витрат енергії на процес сепарації // Прогресивні техніка та технології харчових виробництв, ресторанного господарства та торгівлі. Харків : ДБТУ, 2025. Вип. 4 (38). С.156-166.

14. Богомолов О.В., Михайлов В.М., Завгородній О.І. та ін. Шляхи зниження енергоємності процесів сепарації зернових сумішей. / Прогресивні техніка та технології харчових виробництв, ресторанного господарства та

торгівлі. Вип. 1 (35). 2024р.

15. Богомолів О.В., Михайлов В.М., Завгородній О.І., Ірклієнко В.І., Богомолів О.О., Іващенко С.Г. До питання енергоємності процесів сепарації зернових сумішей. Вісник Том 13, Запоріжжя: ТДАТУ, 2022. –С. 1-8.

16. Богомолів О.В., Михайлов В.М., Завгородній О.І., Ляшенко Б.В., Богомолів О.О., Бойко Є.В. Удосконалення компоновки схем приводів вібраційних сепараторів // Прогресивні техніка та технології харчових виробництв, ресторанного господарства та торгівлі. Харків : ДБТУ, 2025. Вип. 4 (38). С.148-156.

17. Богомолів О.В., Михайлов В.М., Богомолів О.О., Панов В.О. Дослідження параметрів процесу сепарації насіння проса на гравітаційному фрикційному сепараторі // Прогресивні техніка та технології харчових виробництв, ресторанного господарства та торгівлі. Харків : ДБТУ, 2025. Вип. 3 (37). С.188-199.

18. Богомолів О.О. Сепарація насіння проса за дальністю відскоку після удару об похилу відбивну поверхню. Прогресивні техніка та технології харчових виробництв, ресторанного господарства та торгівлі. Вип. 1.(35), 2024р.

19. Богомолів В.П., Зінченко М.О., Богомолів О.О., Удар кулястого тіла об похилу площину.//Сучасні напрямки технології та механізації процесів переробних і харчових виробництв. Вісник ХНТУСГ, -Харків: ХНТУСГ, 2009.-Вип.88.- С. 279-285.

20. Богомолів О.О., Обґрунтування параметрів багатоярусного ударного сепаратора для сепарації насіння ріпаку: дис. канд. тех.наук: 05.05.11.Харків: ХНТУСГ ім. П. Василенка,2020. 231с.

21. Брагінець М.В. Аналіз конструкцій сепараторів для сепарації важкороздільних зернових сумішей / М.В.Брагінець, О.О. Богомолів // Інженерія переробних і харчових виробництв: Вісник ХНТУСГ, м. Харків. 2016. – Вип. № 2. – С. 47–51.

22. Брагінець М.В. Моделювання процесу сепарації насіння ріпаку

сепаратором ударної дії. /М.В.Брагінець, В.Т.Дмитрів, В.С.Хмельовський, О.В.Богомолов, О.О.Богомолов // Техніка та енергетика. Журнал наукових досліджень сільськогосподарського виробництва . – Київ.:2020. – Вип.11. №2 – С.157-164.

23. Бредихін В.В., Богомолов О.В., Сліпченко М.В. та ін. Наукові основи ощадної підготовки насіння з поліпшеним біологічним потенціалом. Монографія. – Харків, Діса+: – 2023. – 408 с.

24. Багаторусний ударний сепаратор: патент на корисну модель. №62244 Україна МПК(2011.01) B07B13/00. /Богомолов О.В., Богомолова В.П., № u 201014867; заяв.13.12.2010; публ.25.08.2011, Бюл.№16,2011р.

25. Випробування сільськогосподарської техніки. Зерноочисні машини та агрегати. Зерноочисно-сушильні комплекси. Методи випробувань: СОУ 74.3-37-147:2004. Київ: Мінагрополітики України. 2006. 26 с.

26. Гулий І.С., ПушанкоМ.М., Орлов Л.О. та ін. «Обладнання підприємств переробної і харчової промисловості». /За ред. Академіка УААН І.С. Гулого. Вінниця: Нова книга, 2001,-576с.

27. Гравітаційний сепаратор сипких сумішей за пружністю та коефіцієнтами тертя: патент на корисну модель №162405, Україна: МПК B07B13/00, Богомолов О.В., Богомолов О.О., Ляшенко Б.В. та ін.-№ u 2025 02908; заявл. 17.06.20254; опубл. 25.03.2026, Бюл. №12-4с.

28. Грідін О.В. Організаційно-економічне обґрунтування інженерних рішень в сфері переробних і харчових виробництв: [методичні рекомендації до економічного обґрунтування дипломних та магістерських робіт] / О.В.Грідін. – Х.: Вид-во «Міськдрук», 2011. – 210 с.

29. Гурняк Л.І. Опір матеріалів/ Л.І.Гурняк, Ю.В.Гуцуляк, Т.Б.Юзків, - Львів: Новий світ, 2005. – 364 с.

30. Дерев'янка Д.А. Вплив технічних засобів та технологічних процесів на травмування і якість насіння: монографія. Житомир: «Полісся», 2015. 774 с.

31. Державна служба Україна з питань безпеки харчових продуктів та

захисту споживачів. <https://dpss.gov.ua/> (дата звернення 25.06.2026).

32. ДСТУ 2240-93. Насіння сільськогосподарських культур: Технічні умови. – К.: Держспоживстандарт України, 1994. – 73 с.

33. ДСТУ 2949- 94. Насіння сільськогосподарських культур: Терміни та визначення. – К.: Держспоживстандарт України, 1995, - 173с.

34. ДСТУ 4138 – 2002. Насіння сільськогосподарських культур: Методи визначення якості. – К.: Держспоживстандарт України, 2003.- 173с.

35. ДСТУ 4397:2005. Методи економічного оцінювання техніки на етапі випробування. Національний стандарт України. Київ.: Київспоживстандарт України, 2005. 23 с.

36. ДСТУ 5026:2008 Просо. Технічні умови.- К.: Держспоживстандарт України, 2010. – 9 с.

37. Завгородній О.І. Періодичний рух частинок в процесі вібросепарації з упровадженням зміни напрямку коливань деки /О.І. Завгородній, О.В. Обихвіст // Науковий вісник НАУ, №92, 4.1, 2005.-с.228-238.

38. Завгородній О.І. Просторовий удар сферичного тіла об перешкоду / О. І. Завгородній, О. В. Сіняєва // Вісник Харків. нац. техн. ун-ту сіл. госп-ва ім. П. Василенка. - Харків : КП "Міська друкарня", 2014. - Вип. 152: Сучас. напрямки технології та механізації процесів перероб. і харч. вир-в. - С. 42-51.

39. Завгородній О.І., Богомолів О.В., Богомолів О.О., Бойко Є.В. Моделювання ударного руху частинки по похилій площині з подачею у поперечному напрямку // Науковий журнал «Технічний сервіс агропромислового, лісового та транспортного комплексів» -Харків: ДБТУ, 2026.-Вип.28.

40. Завгородній О.І., Сіняєва О.В. Траєкторії руху кулі в повітряному потоці між похилими площинами, що коливаються // “Механізація сільськогос-подарського виробництва”: Вісник ХНТУСГ імені Петра Василенка, Вип.148.– Харків, ХНТУСГ, 2014.– С.362-370.

41. Заїка П.М. Теорія сільськогосподарських машин. Том 3, розділ 7. Очистка і сортування насіння / П.М. Заїка. Х: Око, 2006. 408 с.

42. Звіт Міністерства аграрної політики та продовольства України. Київ, 2022. <https://minagro.gov.ua/pro-nas/plani-ta-zviti/zviti-pro-robotu-minagropolitiki> (дата звернення 06.05.2023).

43. Звіт Міністерства економіки України. Київ. <https://www.me.gov.ua/?lang=uk-UA/> (дата звернення 25.06.2026).

44. Здрібнювач зернових сумішей: патент на корисну модель № 162201, Україна: МПК В07В 7/01, Богомолів О.В., Михайлов В.М., Загорулько А.М., Богомолів О.О. та ін. - № у 2025 02921; заявл. 17.06.2025; опубл. 04.03.2026, Бюл.№9 – 4с.

45. Здрібнювач рослинної сировини: патент на корисну модель № 158110, Україна: МПК В07В 7/01, Богомолів О.В., Ірклієнко В.І., Михайлов В.М., Богомолів О.О. та ін. № у 2024 01912; заявл. 11.04.2024; опубл. 01.01.2025, Бюл.№1 – 4с.

46. Зефіров В.М. Вільні коливання частинки по поверхні деки сепаратора з таутохронним профілем / В.М. Зефіров, О.І. Завгородній, В.О. Сметанкін // Науковий вісник національного аграрного університету.-Київ: Вид-во НАУ, 1998.-с.139-143

47. Кобец А.С., Чурсинов Ю.О., Черных С.А. та ін. Машини та обладнання для зберігання та комплексної обробки зерна. Дніпропетровськ.: ДДАЕУ, 2014. 614 с.

48. Комаристов В.Ю., Петренко М.М. Довідник з механізації післязбиральної обробки зерна. – К.: Урожай, 1990. 194 с.

49. Котов Б.І. Моделювання технологічних процесів в типових об'єктах післязбиральної обробки і зберігання зерна (очищення, сепарація, сушіння, активне вентилявання, охолодження): Колект. монографія / Котов Б.І. та ін.; Нац. акад. аграр. наук України. – Київ, 2017. – С. 504-551.

50. Котов Б.І., Спирін А.В., Твердохліб І.В., Степаненко С.П., Швидя В.О. До питання пневмогравітаційної сепарації зернових матеріалів. *Процеси та обладнання переробних і харчових виробництв*. Глеваха, 2017. Вип. 4 (99). С. 51 – 55.

51. Кучеренко С.І., Бурлака В.В., Тіщенко Л.М., Мазоренко Д.І., Булгаков В.М., Калетнік Г.М., Кравченко І.Є., Березовой М.Г. Теоретична механіка: навчальний посібник / за ред. Кучеренка С.І. Харків, 2012. 568 с.

52. Лихочвор В.В., Петриченко В.Ф., Іващук П.В. Зерновиробництво. Львів: НВФ «Українські технології», 2008. 624 с.

53. Лобас М.Г. Розвиток зернового господарства України / М.Г. Лобас. – К., 1997. –447 с.

54. Машина для сортування насіння. Прилуцький А.Н., Степаненко С.П.: пат. КМ 102768 України. № u201502227; заявл. 13.03.2015; опубл. 25.11.2015, Бюл. №22. 4 с.

55. Машини і обладнання для зберігання та комплексної обробки зерна /А.С. Кобец, Ю.О. Чурсінов, С.А. Черних та ін.- Дніпропетровськ: ДДАЕУ, 2014.-614с.

56. Механіко-технологічні властивості сільськогосподарських матеріалів [Електронний ресурс]: практикум/ Ю.О. Манчинський, М.В. Бакум, В.І. Пастухов та ін. 2-е вид., перероб і доп.-Харків: 2010.- 224 с.

57. Насіннєзнавство та методи визначення якості насіння сільськогосподарських культур: навчальний посібник / за ред. С.М. Каленської. Вінниця, 2011. 323 с.

58. Насіннєочисна машина. Прилуцький А.Н., Степаненко С.П.: пат. КМ 98264 України № u 201411391; заявл. 12.09.2014; опубл. 27.04.2015, Бюл. №3. 4 с.

59. Ольшанський В.П. Ateb-синус у розв'язку задачі Герца при ударі / В.П.Ольшанський, С.В.Ольшанський // Вісник НТУ «ХПІ» Серія: Математичне моделювання в техніці та технологіях. – Харків: НТУ «ХПІ», 2018 – №3 (1279) – с.98–193.

60. Ольшанський В.П. Про взаємодію важкого твердого тіла з пружним півпростором. / В.П. Ольшанський, О.В. Богомолів, О.О. Богомолів //Сучасні напрями технології та механізації процесів переробних та харчових виробництв: Вісник ХНТУСГ. – Х.: 2018. – Вип. № 194.– С. 38–46.

61. Ольшанський В.П. Про перетворення ударом задемпфованої механічної системи в осцилятор / В.П. Ольшанський, О.В. Богомолів, О.О. Богомолів //Сучасні напрями технології та механізації процесів переробних та харчових виробництв: Вісник ХНТУСГ, м. Харків. 2018. – Вип. №194. – С. 18–31.

62. Ольшанський В.П. Про рух осцилятора зі степенною характеристикою пружності / В.П.Ольшанський // Вібрації і техніці та технологіях, 2017. №3 (68) – с.34-40.

63. Ольшанський В.П. Про удар в'язко-пружного тіла об жорстку перешкоду / В.П.Ольшанський // Вісник НТУ «ХПІ», Сер.: Динаміка і міцність машин, 2018. - №38 (1314) – с.37-41.

64. Ольшанський В.П., Бредихін В.В., Лук'яненко В.М., Півень М.В., Сліпченко М.В., Харченко С.О. Теорія сепарування зерна: монографія. Харків: ХНТУСГ ім. П. Василенка, 2017. 802 с.

65. Ольшанський В.П. Узагальнена задача механічного удару в теорії Герца/ В.П. Ольшанський, С.В. Ольшанський//Вібрації в техніці та технологіях, 2018, № 4(91)-с.70-75

66. Ольшанський В.П., Сліпченко М.В., Ольшанський О.В., Бредихін В.В. Динаміка імпульсно навантажених нелінійних осциляторів : монографія. Харків: ХНТУСГ ім. П. Василенка, 2021. 262 с.

68. Паранчук Я. С., Мороз В. І. Обчислювання та програмування в Mathcad: підручник. — Львів : Видавництво Львівської політехніки, 2013. — 364 с.

69. Пристрій для розподілу зернових матеріалів за пружними властивостями. Деклараційний патент №57958 Україна, МКВ В07 В13/00 Богомолів О.В., Токолов Ю.І., Зінченко М.О., Заявл. 7.03.2002, Опубл. 15.07.2003 Бюл. №7

70. Петров А.М., Алфьоров О.І., Науменко А.О., Марченко М.В. Опір матеріалів: навчальний посібник. Харків: «Диса плюс», 2021. 253 с.

71. Повітряно-гравітаційний сепаратор. Патент України КМ №50652 / Степаненко С.П., Швидя В.О., Котов Б.І., Коваль Ю.Г. № u200909501; заявл. 16.09.2009; опубл. 25.06.2009, Бюл.№12. 4 с.

72. Прилад для визначення коефіцієнтів тертя сипких матеріалів: патент на корисну модель № 158522, Україна: МПК G01 N19/02, Богомолів О.В., Михайлов В.М., Богомолів О.О. та ін. - № u 2024 01911; заявл. 11.04.2024; опубл. 19.02.2025, Бюл. №8 – 4с.

73. Пристрій для виробництва борошна: патент на корисну модель № 162345 Україна, МПК В 02 С 4/00. В 02 С 4/06. Богомолів О.В., Гурський П.В., Денисенко С.А., та ін. - № 2025 02 910; Заявл. 17.06.2025; Опубл. 18.03.2025, Бюл. № 11. - 4 с.

74. Продовольча та сільськогосподарська організація Об'єднаних Націй (FAO).<https://www.fao.org/home/ru> (дата звернення 25.06.2026).

75. Степаненко С.П. Техніко-технологічні основи вдосконалення сепарації зерна і насіння. *Праці Таврійського державного агротехнологічного університету*. Мелітополь, 2009. Вип. 9. Т. 1. С. 66 – 74.

76. Степаненко С.П., Котов Б.І., Калініченко Р.А, Швидя В.О., Лісецький В.О. Моделювання технологічних процесів в типових об'єктах післязбиральної обробки і зберігання зерна: монографія. Ніжин, 2017. 552 с.

77. Степаненко С.П., Прилуцький А.Н. Інтенсифікація процесів післязбиральної обробки зерна – основа ефективності його виробництва. *Вісник аграрної науки*, 2010. Вип. 10. С. 65 – 59.

78. Тікунов С.Р., Бредихін В.В., Сметанкіна Н.В. Дослідження пропускної спроможності сепаруючих робочих поверхонь. *Сучасна інженерія агропромислових і харчових виробництв*: матеріали Міжнародної науково-практичної конференції. (Харків, 25-26 листопада 2021 р.). Харків: ДБТУ, 2021. С. 76 – 77.

79. Харченко С.А. Концепція інтенсифікації процесів віброрешітного просіювання зернових сумішей: автореф. дис. ...докт. техн. наук: 05.05.11. Харків: ХНТУСГ ім. П. Василенка, 2017. 332 с.

80. Царенко О.М., Войтюк Д.Г., Швайка В.М., Довжик М.Я., Яцун С.С. Механіко – технологічні властивості сільськогосподарських матеріалів / за ред. С.С. Яцуна. Київ: Мета, 2 – 3. 449 с.

81. Чорновол М.І., Черкун В.Ю., Аулін В.В. та ін. Надійність сільськогосподарської техніки; за заг. ред. М.І. Черновола. Кіровоград: КОД, 2010. 320 с.

82. Шелест А.Г. Сепарування зернових мас із використанням сил гравітації / А.Г. Шелест, Т.П. Чернишук, В.С. Кошулько // Ж. Хранение и переработка зерна, 2017. –№11.– С.47–49.

83. Al-Lwayzy S. H. Grading of wheat seed by using specific gravity separator locally manufacture: M. Sc. thesis in Agricultural Machinery/ Saddam Hussien M. H. Al-Lwayzy/ Mosul Univ., Iraq, 2001.-108p.

84. Ali, M., et al (2021). Pneumatic Separation of Millet Seed: Comparative Efficiency of Mechanical and Airflow System. Agricultural Technology Research.

85. Aliev, E. B. (2018). Results of the experimental study of separation process seeds in aerodromic separator. Інноваційні технології та сучасні селекційні досягнення у виробництві олійної сировини. Збірник тез Міжнародної наукової інтернет-конференції (26 жовтня 2018 р.). Запоріжжя. ІОК НААН. С. 70-71.

86. Aliev, E. B., Bandura, V. M., Pryshliak, V. M., Yaropud, V. M., Trukhanska, O. O. (2018). Modeling of mechanical and technological processes of the agricultural industry. INMATEN – Agricultural Engineering. Vol.54, No. 1. P. 95-104.

87. Aliev, E. B., Yaropud, V. M., Dudin, V. Yr., Pryshliak, V. M., Pryshliak, N.V., Ivlev, V. V. (2018). Research on sunflower seeds separation by airflow. INMATEN - Agricultural Engineering. Vol.56, No. 3. P. 119-128.

88. Al-Sandouk J. M. Study of performance efficiency of seed separation machine by specific gravity: M. Sc. thesis in Agricultural Mechanization/ Jafar Mahdi Jafar Al-Sandouk/ Mosul Univ., Iraq, 2000.-133p.

89. Andres F.Doblado-Maldonadoa Oscar A.PikebJess C.SweleyaDevin

J.Rose Key issues and challenges in whole wheat flour milling and storage. *Journal of Cereal Science* Volume 56, Issue 2, September 2012, Pages 119-126.

90. Bhargava A., Shukla S., Ohri D., Chenopodium quinoa—an Indian perspective[J], *Ind. Crop. Prod.* 23 (1) (2006) P. 73–87,

91. Bredikhin V., Shevchenko V. K matematicheskoy modeli razdeleniya zernovykh smesej po plotnosti cilindricheskimi rabochimi poverkhnostjami. *MOTROL Motoryzacja i Energetyka Rolnictwa*. 2015. T. 17. № 7. P. 39 – 44.

92. Bredykhin Vadim, Pak Andrey, Gurskyi Petro, Denisenko Sergey, Bredykhina Khrystyna. Improving the mechanical mathematical model of pneumatic vibration centrifugal fractionation of grain materials based on their density. Improving the Mechanical Mathematical Model of Pneumatic Vibration Centrifugal Fractionation of Grain Materials Based on Their Density. *European Journal of Enterprise Technologies*. 2021. T. 4/1. № 112. P. 54 – 61. **(Scopus)** (the author's contribution consists in modeling the process of SM segregation by seed density).

93. Bredykhin Vadym, Gurskyi Petro, Alfiorov Oleksiy, Bredykhina Khrystyna, Pak Andrey. Improving the mechanical-mathematical model of grain mass separation in a fluidized bed. *European Journal of Enterprise Technologies*. 2021. T. 3 № 1. P. 79 – 86. **(Scopus)** (the author's contribution consists in modeling the process of SM segregation by seed density).

94. Clark B. Cleaning seeds by fluidized bed medium. *Transactions of the ASAE*. 1983. Vol. 26. N 4. P. 987 – 990.

95. Clark B. Cleaning seeds by fluidized. *Journal of Agricultural Engineering Research*. 1985. Vol. 31. N 3. P. 231 – 242.

96. Cveticanin L. Oscillator with a Sum of Noninteger – Order Nonlinearities / L. Cveticanin, T. Pogany // Hindawi Publishing Corporation, *Journal of Applied Mathematics*, 2012, Article ID 649050, 20p.

97. Dariusz Dziki. Effect of preliminary grinding of the wheat grain on the pulverizing process. *Journal of Food Engineering* Volume 104, Issue 4 June 2011 Pages 585-591.

98. Dutta S. K., Nema V. K., & Bhardwaj R. J. Physical properties of gram. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 39, 1988. 259–268.
99. Eberhard, P., Alkhaldi, H. (2006). Efficient Computation of Colliding Particles in a Vertical Tumbling Sorting Machine. Proceedings Second International Congress on Computational Mechanics and Simulation (ICCMS), Vol. 1. 1. K. Publishing House, New Delhi, India. P. 81-87.
100. Elchin Aliev, Viktor Pryshliak, Vitaly Yaropud. (2017). Research of physical and mechanical properties of oilseed crops. MOTROL. Commission of Motorization and Energetics in Agriculture. Lublin – Rzeszow. Vol. 19, No. 3. P. 103-108
101. Elizabeth Clayton Ukrainian Agriculture / The Ukrainian Economy Achievements, Problems, Challenges. – Cambridge, Massachusetts. – 1992. P. 235 – 250.
102. Fu G. An extension of Hertz's theory in contact mechanics / G. Fu // Trans. ASME. Journal of Applied Mechanics.- 2007 Vol.74, №2.- P.373-374.
103. G.t M.Campbell, CalumSharp, KevinWall, FernánMateos-Salvador, SabineGubatz, AlisonHuttly, PeterShewry. Modelling wheat breakage during roller milling using the Double Normalised Kumaraswamy Breakage Function: Effects of kernel shape and hardness Author links open overlay panel. *Journal of Cereal Science* Volume 55, Issue 3, May 2012, Pages 415-425.
104. Gendelman O. Transition from localization to nonlocalization in strongly nonlinear damped oscillators / O. Gendelman, A.F. Vakakis // *Chaos, Solitons and Fractals*, 2000, Vol.11, № 10 –P. 1535-1542.
105. Cveticanin L. Oscillator with a Sum of Noninteger – Order Nonlinearities / L. Cveticanin, T. Pogany // Hindawi Publishing Corporation, *Journal of Applied Mathematics*, 2012, Article ID 649050, 20P.
106. Pukach P.Ya. Resonance phenomena in quasi-zero stiffness vibration isolation systems / P.Ya. Pukach, I.V. Kuzio // *Naukovyi Visnyk Nationalnogo Hirnychoho Universytetu*, 2015. Issue 3. P. 62-67.
107. Goldberg D. Genetic algorithms in the optimization and machine

learning. Addison Wesley. 1988.

108. Goldshtein, A., Shapiro, M. (1995). Mechanics of collisional motion of granular materials. Part 1. General hydrodynamic equations. J. Fluid Mech. Vol. 282. P. 75-114.

109. Gunaji Ashok Sawant, V. Murali Mohan, Sandip Ashok Savant.(2016). Study and Analysis of Deck inclination angle on Efficiency of Vibration Screen. International Journal of Engineering Development and Research. Volume 4. Issue 1. P. 631-635.

110. Gupta, A., et al (2020) Energy Efficiency in Seed Processing and Modern Equipment. Journal of Sustainable Agricultural and Systems

111. Hashem Alkhalidi . (2007). Contact Investigation of Granular Mechanical Media in Tumbling Sorting Machine . Institut Fur Technische Und Numerische Mechanik Der Universitat Stuttgart. 122 p.

112. Hertz H. Uber die Beruhrung Feste Elastischer Korper // Journal fur die Reine und Angewandte Mathematik. 1882. B. 92. P.156-171.

<http://agrocart.com/2796/raps-v-kormlenii-zhivotnyx>.

<http://soft-agro.com/kormovoe-syre/rapsovyj-shrot-i-zhmux-v-kormlenii-korov-svineji-pticy.html>.

113. Hunt K.H. Coefficient of Restitution Interpreted as Damping in Vibroimpact / K.H.Hunt, F.R.E. Crossley // Trans. ASME. Journal of Applied Mechanics. 1975. №6. P.440-445.

114. Hutter, K., Rajagopal, K.R. (1994). On the flows of granular material. Contin. Mech. Thermodyn. Vol.6. P. 81-139.

115. Ivanov A. P. Journal of Applied Mathematics and Mechanics, 1988 Vol: 52, Issue: 6, Page: 700-704.

116. Jaeger H.M., Nagel S.R. and Behringer P.P., (eds.). Powders and grain 97 // Balkema, Rotterdam, 1997.

117. Joshi, D. C., Das, S.K., Mukherjee, R. K. (1993). Physical properties of pumpkin seeds. Journal of Agricultural Engineering Research. (1993) Vol. 54, P. 219-229.

118. Kolymbas D., ed. Constitutive modeling of granular materials // Springer, Berlin. 2000.
119. Kondic L., Hartley R.R., Tennakoon S.G.K., Painter B. and Behringer R.P. Segregation by friction // arXiv:cond-mat/0210682. V.I, 30. Oct., 2002.
120. Lammens, J. (1994). A computational model of color perception and color naming. Ph.D. thesis, State University of New York. Genoa. 253 p.
121. Li, J, et al (2020) Optical Sorting Technology in Millet Processing: Enhancing Quality and Reducing Losses. Journal of Agricultural Engineering.
122. Luding, S. (1998). Collisions and Contacts two Particles, Physics of Dry Granular Media. E350-NATO ASI series, Dordrecht, Kluwer Academic Publishers. P. 285-314.
123. Mohammad Hossein Abbaspour-Fard. (2000). Discrete element modelling of the dynamic behavior of non-spherical particulate materials. A thesis of Doctor of Philosophy. University of Newcastle upon Tyne. 275 p.
124. Mohammad Saeid Emami Naeini. (2011). Discrete Element Modeling of Granular Flows in Vibrationally – Fluidized Beds. A thesis of Doctor of Philosophy. Industrial Engineering University of Toronto. 130 p.
125. Muth, B., Eberhard, P., Luding, S. (2003). Contact Simulation for Many Particles Considering. Mechanics Based Design of Structures and Machines. Vol. 31. No. 3. P. 433-457.
126. Ogunjimi L. Some engineering properties of locust bean seed / L. Ogunjimi, N. Aviara, O. Aregbesola // Some engineering properties of locust bean seed. Journal of Food engineering., - 2002 – Vol. 55(2) – P. 95-99.
127. Ol'shanskii V. Modeling the elastic impact of a body with a special point at its surface / V. Ol'shanskii, O. Spol'nik, M. Slipchenko, V. Znaidiuk // Eastern-European Journal of Enterprise technologies, 2019, 1/7 (97). P. 25-32.
128. Oleksiy Bohomolov, Oleksiy Zavhorodnii, Vadym Bredykhin, Petro Hurskyi, Oleksandr Bohomolov, Taras Shchur, Patrycja Walichnowska, Kruszelnicka, Andrzej Tomporowski. Modeling the impact of elastic bodies taking into account dry positional friction and the coefficient of velocity

restoration//Advances in Science and Technology Research Journal. ISSN 2299-8624 Volume 19, Issue 7, 2025.

129. Oscillations with positional friction under mechanical shock / Vasyl Olshansky, Oleksii Bogomolov, Oleksii Bogomolov, Viktor Irklienko, Lilia Kys-Korkyshenko // Tekn. A QUARTERLY JOURNAL OF AGRICULTURE INDUSTRY. – 2019, Vol. 19, № 1, P. 49–58.

130. Panasiewicz M. The technique and analysis of the process of separation and cleaning grain materials / M. Panasiewicz, P. Sobczak, J. Mazur, K. Zawislak, D. Andrejko// Journal of Food Engineering, 2012.-P. 603-608.

131. Physics of dry granular media, edited by Herrmann H.J., Holm J.P. and Luding S., Nato, ASI, Ser. E. Vol. 350. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht. 1998.

132. Pukach P. Investigation of bending vibrations Voigt-Kelvin bars with regard for nonlinear resistance force/ P. Pukach // Journal of Mathematical Sciences. 2016, Vol. 215, Issue 1. P. 71-78.

133. Pukach P.Ya. Resonance phenomena in quasi-zero stiffness vibration isolation systems / P.Ya. Pukach, I.V. Kuzio // Naukovyi Visnyk Nationalnogo Hirnychoho Universytetu, 2015. Issue 3. P. 62-67.

134. Schwedes J. Review on testers for measuring flow properties of bulk solids. Granular Mater. 2003. Vol. 5, No 1. P. 1-43. DOI:10.1007/S10035-002-0124-4.

135. Shevchenko, I. A., Aliev, E. B. (2018). Research on the photoelectronic separator seed supply block for oil crops. INMATEN - Agricultural Engineering. Vol.54, No. 1. P. 129-138.

136. Shevchenko, I. A., Aliev, E. B. (2018). Study of the process of calibration confectionery sunflower seeds. Food Science and Technology. Volume 12 Issue 4. P. 135-142.

137. Slipchenko M., Bredykhin V., Pak A., Gurskyi P., Alforyov O., Pak A. (2023). Constructing a physical-mathematical model of grain mass self-heating by a rod site of rectangular cross-section. Eastern-European Journal of Enterprise

Technologies, 5/8 №125, P. 24 – 30. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2023.287391> (**Scopus**) (*the author's contribution consists in the development of a mathematical model for the separation of seed materials*).

138. Slipchenko Maksym, Bredykhin Vadym, Kis-Korkishhenko Liliia, Pak Andrey, Alfeyorov Oleksiy. Construction of a physical-mathematical model of oscillations of the unbalanced vibrator of the pneumatic sorting table. European Journal of Enterprise Technologies. 2023. T. 4/7. № 124. P. 89 – 98. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2023.281425> (**Scopus**) (*the author's contribution consists in the study of non-stationary oscillations of oscillators under the action of long and short-term pulses*).

139. Vadym Bredykhin, Stanislav Tikunov, Maksim Slipchenko, Oleksiy Aifeyorov, Alexey Bogomolov, Taras Shchur, Slawomir Kocira, Piotr Kiczorowski, Rostyslav Paslavskyy (2023). Improving efficiency of corn seed separation and calibration process. Sciendo. Agricultural Engineering. 2023. Vol. 27, No. 1. P. 241 – 253. DOI:

140. Vermeer P.A., Diebels S., Ehlers W., Hermann H., Luding S. and Ramm E., eds., Continuous and discontinuous modelling of cohesive-frictional materials // Springer, Berlin, 2001.

141. Wariam Chuayjan. (2010)/ Mathematical modelling of granular flows and its applications. A thesis of Doctor of Philosophy. Mahidol University. 115 p.

142. Zavgorodniy A. I. Periodic Vibro-Impact Mode of Motion of Spherical Particles along the Sine Curve / A. I. Zavgorodniy, Montaser Kh. Khessro // International Journal of Enhanced Research in Science Technology & Engineering. –Vol. 3 Issue 3.-March-2014.-pp. 127-131.

143. Zhanfu Li. Xin Tong. (2015). A study of particles penetration in sieving process on a linear vibration screen. Int J Coal Sci Technol. No. 2(4). P. 299-305.

144. Zhang. X., et al (2019). Innovative Pneumatic and Optical Sorting System for Small Grain Seeds, International Journal of Agricultural Machinery and Technology.

ДОДАТКИ

Варіаційні ряди фізико механічних властивостей насіння

Таблиця А.1 – Варіаційні ряди товщини насіння

		Найменування зерна		
		Просо	Щетинник сизий	Куряче просо
Класовий проміжок, мм	0,9-1,0			1
	1,0-1,1			5
	1,1-1,2			18
	1,2-1,3		1	30
	1,3-1,4		24	25
	1,4-1,5		35	14
	1,5-1,6		30	6
	1,6-1,7	2	4	1
	1,7-1,8	3	3	
	1,8-1,9	17	2	
	1,9-2,0	40	1	
	2,0-2,1	25		
	2,1-2,2	6		
	2,2-2,3	4		
	2,3-2,4	2		
	2,4-2,5	1		

Таблиця А. 2 – Варіаційні ряди ширини насіння

		Найменування зерна		
		Просо	Щетинник сизий	Куряче просо
Класовий проміжок, мм	1,4-1,5			2
	1,5-1,6			3
	1,6-1,7			9
	1,7-1,8		1	16
	1,8-1,9		2	32
	1,9-2,0		12	25
	2,0-2,1		37	6
	2,1-2,2	3	33	4
	2,2-2,3	5	12	2
	2,3-2,4	7	2	1
	2,4-2,5	40	1	
	2,5-2,6	23		
	2,6-2,7	13		
	2,7-2,8	6		
	2,8-2,9	3		

Таблиця А. 3 – Варіаційні ряди довжини насіння

		Найменування зерна		
		Просо	Щетинник сизий	Куряче просо
Класовий проміжок, мм	2,3-2,4			1
	2,4-2,5			2
	2,5-2,6			4
	2,6-2,7		3	10
	2,7-2,8	3	4	22
	2,8-2,9	4	7	14
	2,9-3,0	6	11	11
	3,0-3,1	14	13	10
	3,1-3,2	17	16	9
	3,2-3,3	32	30	9
	3,3-3,4	16	13	4
	3,4-3,5	6	3	2
	3,5-3,6	2		1

Таблиця А.4 – Варіаційні ряди граничних кутів підйому насіння вібраційній по неперфорованій поверхні. Матеріал – сталь

		Найменування зерна		
		Просо	Щетинник сизий	Куряче просо
Класовий проміжок, град.	0-2	3		
	2-4	5		
	4-6	23		2
	6-8	37	3	4
	8-10	23	10	15
	10-12	7	25	33
	12-14	2	33	30
	14-16		23	17
	16-18		13	7
	18-20		3	2

Таблиця А.5 – Варіаційні ряди граничних кутів підйому насіння по вібраційній неперфорованій поверхні. Матеріал – фанера технічна

		Найменування зерна		
		Просо	Щетинник сизий	Куряче просо
Класовий проміжок, град.	0-2	1		
	2-4	2		
	4-6	18		
	6-8	39		
	8-10	32	2	3
	10-12	7	6	27
	12-14	1	15	34
	14-16		39	19
	16-18		29	9
	18-20		10	5
	20-22		1	3

Таблиця А.6 – Варіаційні ряди траєкторій руху насіння по вібраційній неперфорованій поверхні. Матеріал – фанера технічна

		Найменування зерна		
		Просо	Щетинник сизий	Куряче просо
Класовий проміжок, град.	0-10	3		
	10-20	5		
	20-30	10		
	30-40	17		
	40-50	30	2	
	50-60	20	5	2
	60-70	7	12	6
	70-80	5	17	14
	80-90	3	20	17
	90-100		16	22
	100-110		12	16
	110-120		10	12
	120-130		5	7
	130-140		1	3
	140-150			1
	150-160			
	160-170			
	170-180			

Таблиця А.7 – Варіаційні ряди коефіцієнтів тертя насіння. Матеріал – сталь

		Найменування зерна		
		Просо	Щетинник сизий	Куряче просо
Класовий проміжок	0-0,05	4		
	0,05-0,15	33	3	
	0,15-0,25	37	10	2
	0,25-0,35	18	20	15
	0,35-0,45	5	30	30
	0,45-0,55	3	20	35
	0,55-0,65		10	15
	0,65-0,70		7	3

Таблиця А.8 – Варіаційні ряди коефіцієнтів тертя насіння.

Матеріал – фанера технічна

		Найменування зерна		
		Просо	Щетинник сизий	Куряче просо
Класовий проміжок	0,1-0,2	2		
	0,2-0,3	25	2	
	0,3-0,4	35	7	2
	0,4-0,5	23	20	16
	0,5-0,6	10	27	25
	0,6-0,7	5	25	33
	0,7-0,8		13	17
	0,8-0,9		6	4

Таблиця А.9 – Варіаційні ряди коефіцієнтів відновлення швидкості під час удару. Матеріал – сталь

		Найменування зерна		
		Просо	Щетинник сизий	Куряче просо
Класовий проміжок	0,05-0,1		2	1
	0,1-0,15		6	3
	0,15-0,2	2	18	13
	0,2-0,25	3	30	26
	0,25-0,3	5	25	32
	0,3-0,35	10	12	15
	0,35-0,4	20	5	6
	0,4-0,45	25	2	4
	0,45-0,5	20		
	0,5-0,55	10		
	0,55-0,6	3		
	0,6-0,65	2		
	0,65-0,7			

Таблиця А.10 – Варіаційні ряди коефіцієнтів відновлення швидкості
під час удару насіння. Матеріал – фанера технічна

		Найменування зерна		
		Просо	Щетинник сизий	Куряче просо
Класовий проміжок	0-0,1		2	1
	0,1-0,15		4	4
	0,15-0,2		15	11
	0,2-0,25	1	35	28
	0,25-0,3	3	25	31
	0,3-0,35	5	12	20
	0,35-0,4	18	5	4
	0,4-0,45	30	2	1
	0,45-0,5	23		
	0,5-0,55	12		
	0,55-0,6	5		
	0,6-0,65	3		

Таблиця А.11 – Варіаційні ряди коефіцієнтів тертя ковзання насіння.
Матеріал – фанера технічна

		Найменування зерна		
		Просо	Щетинник сизий	Куряче просо
Класовий проміжок	0,1-0,2	5	1	
	0,2-0,3	28	6	4
	0,3-0,4	37	12	6
	0,4-0,5	21	24	19
	0,5-0,6	7	28	27
	0,6-0,7	2	20	31
	0,7-0,8		7	12
	0,8-0,9		2	1

Таблиця А.12 – Варіаційні ряди коефіцієнтів тертя руху насіння.

Матеріал – фанера технічна

		Найменування зерна		
		Просо	Щетинник сизий	Куряче просо
Класовий проміжок	0-0,05	2		
	0,05-0,15	31	5	4
	0,15-0,25	42	14	5
	0,25-0,35	20	27	17
	0,35-0,45	4	34	26
	0,45-0,55	1	16	30
	0,55-0,65		4	15
	0,65-0,75			3

Таблиця А.13 – Варіаційні ряди коефіцієнтів тертя руху насіння.

Матеріал – сталь

		Найменування зерна		
		Просо	Щетинник сизий	Куряче просо
Класовий проміжок	0-0,05	5		
	0,05-0,15	37	4	2
	0,15-0,25	46	16	8
	0,25-0,35	10	30	20
	0,35-0,45	2	35	30
	0,45-0,55		12	33
	0,55-0,65		3	5
	0,65-0,75			2

Таблиця Б.1 – Варіаційні ряди дальності польоту насіння після удару
об похилу площину

Найменування			Класовий проміжок, см.												
		зерно	0-2	2-4	4-6	6-8	8-10	10-12	12-14	14-16	16-18	18-20	20-22	22-24	24-26
Поверхня	фанера	просо						8	4	5	18	28	25	15	3
		мишій		2	11	17	21	20	15	11	3				
		куряче просо	2	5	18	25	17	15	12	4	2				
	сталь технічна	просо					2	4	5	13	22	25	18	9	2
		мишій		5	14	17	21	17	12	10	2				
		куряче просо	2	7	17	23	17	15	12	6	1				

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ДЕРЖАВНИЙ БІОТЕХНОЛОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

ПОГОДЖЕНО

Проректор з наукової роботи ДБТУ

ЗАТВЕРДЖУЮ

Директор СФГ «Калина»



Валерій МИХАЙЛОВ
2025 р.

Олександр КУЛІНІЧЕВ
2025 р.

А К Т

ВПРОВАДЖЕННЯ НАУКОВО-ДОСЛІДНОЇ РОБОТИ У ВИРОБНИЦТВО

Замовник СФГ «КАЛИНА»

Кулінічев Олександр Олексійович

(П.І.Б. керівника організації)

Цим актом підтверджується, що результати роботи, яку виконано на тему №55-23 -24Д
«Обґрунтування параметрів процесу сепарації зернових сумішей за сукупністю фізико-механічних властивостей»

(найменування теми, № держ. реєстрації)

на кафедрі Обладнання та інжинірингу переробних і харчових виробництв
вартістю 45000,00 грн (сорок п'ять тисяч грн 00 коп.)

(цифрами та прописом)

яка виконувалася з 05.12.2023р. по 31.05.2024р.

впроваджені СФГ «КАЛИНА»

(найменування підприємства, де здійснювалось впровадження)

1. Вид впроваджених результатів: Рекомендації щодо раціональних параметрів сепарації насіння проса

(експлуатація виробу, роботи, технології; виробництво виробу, роботи, технології, функціонування систем)

2. Характеристика масштабу впровадження універсальне

(унікальне, одиначне, партія, масове, серійне)

3. Форма впровадження:

Методика (метод): Обґрунтування раціональних параметрів процесу сепарації насіння проса на гравітаційних сепараторах

4. Новизна результатів науково-дослідних робіт: розроблено якісно нові процеси сепарації насіння проса

(піонерські, принципово нові, якісно нові, модифікація, модернізація старих розробок)

5. Дослідно-промислова перевірка

(найменування підприємства, період)

6. Впроваджені:

- в промислове виробництво СФГ «КАЛИНА»

(участок, цех/и, процес)

- в проектні роботи

(вказати об'єкт, підприємство)

7. Річний економічний ефект (розрахунок додається)

очікуваний 20960,0 тис. грн.

(від впровадження в проект)

фактичний 62880,0 тис. грн.

8. Соціальний і науково-технічний ефект

(охорона навколишнього середовища, надр; оздоровлення та покращення умов праці, удосконалення структури управління, науково-технічних напрямків, спеціальні призначення і т.п.)

ВІД ВИКОНАВЦЯ

Керівник роботи

Олександр БОГОМОЛОВ

ВІД ПІДПРИЄМСТВА

Олександр КУЛІНІЧЕВ

(підпис)

(ініціали, прізвище)

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

ДЕРЖАВНИЙ БІОТЕХНОЛОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ



ПОГОДЖЕНО
Проректор з наукової роботи ДБТУ

Валерій МИХАЙЛОВ

М.П. «*05*» _____ 2026 р.

Код 44234756

ЗАТВЕРДЖУЮ

Директор СФГ «Калина»



Олександр КУЛІНІЧЕВ

М.П. «*05*» _____ 2026 р.

А К Т

ВПРОВАДЖЕННЯ НАУКОВО-ДОСЛІДНОЇ РОБОТИ У ВИРОБНИЦТВО

Замовник СФГ «КАЛИНА» директор Кулінічев Олександр Олексійович

(П.І.Б. керівника організації)

Цим актом підтверджується, що результати роботи, яку виконано на тему №55-23-24Д
«Обґрунтування параметрів процесу сепарації зернових сумішей за сукупністю фізико-механічних властивостей»

(найменування теми, № держ. реєстрації)

на кафедрі Обладнання та інжинірингу переробних і харчових виробництв

вартістю 45000,00 грн (сорок п'ять тисяч грн 00 коп.)

(цифрами та прописом)

яка виконувалася з 05.12.2023р. по 31.05.2024р.

впроваджені СФГ «КАЛИНА»

(найменування підприємства, де здійснювалось впровадження)

1. Вид впроваджених результатів: Рекомендації щодо раціональних параметрів сепарації насіння проса

(експлуатація виробу, роботи, технології; виробництво виробу, роботи, технології, функціонування систем)

2. Характеристика масштабу впровадження універсальне

(унікальне, одиночне, партія, масове, серійне)

3. Форма впровадження:

Методика (метод): Обґрунтування раціональних параметрів процесу сепарації насіння проса на гравітаційних сепараторах

4. Новизна результатів науково-дослідних робіт: розроблено якісно нові процеси сепарації насіння проса

(піонерські, принципово нові, якісно нові, модифікація, модернізація старих розробок)

5. Дослідно-промислова перевірка

(найменування підприємства, період)

6. Впроваджені:

- в промислове виробництво СФГ «КАЛИНА»

(участок, цех/и, процес)

- в проектні роботи

(вказати об'єкт, підприємство)

7. Річний економічний ефект (розрахунок додається)

очікуваний 20960,0 тис. грн.

(від впровадження в проект)

фактичний 62880,0 тис. грн.

8. Соціальний і науково-технічний ефект

(охорона навколишнього середовища, надр, оздоровлення та покращення умов праці, удосконалення структури управління, науково-технічних напрямків, спеціальні призначення і т.п.)

ВІД ВИКОНАВЦЯ

Олександр БОГОМОЛОВ

(підпис) (ініціали, прізвище)

ВІД ПІДПРИЄМСТВА

Олександр КУЛІНІЧЕВ

(підпис) (ініціали, прізвище)

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

ДЕРЖАВНИЙ БІОТЕХНОЛОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ



ПОГОДЖЕНО

Проректор з наукової роботи ДБТУ

Валерій МИХАЙЛОВ

М.П. «31» травня 2024 р.



ЗАТВЕРДЖУЮ

Фізична особа-підприємець

Євген БОЙКО

М.П. «31» травня 2024 р.

А К Т

ВПРОВАДЖЕННЯ НАУКОВО-ДОСЛІДНОЇ РОБОТИ У ВИРОБНИЦТВО

Замовник Фізична особа-підприємець Бойко Євген Володимирович

Цим актом підтверджується, що результати роботи, яку виконано на тему № 55-23-24 Д «Обґрунтування параметрів процесу сепарації зернових сумішей за сукупністю фізико-механічних властивостей», номер державної реєстрації 0123U105326

(найменування теми, № держ. реєстрації)

на кафедрі Обладнання та інжинірингу переробних і харчових виробництв
вартістю 45000,00 грн (сорок п'ять тисяч грн 00 коп.)

(цифрами та прописом)

яка виконувалася з 05.12.2023 р. по 31.05.2024 р.впроваджені в Фізична особа-підприємець Бойко Євген Володимирович

(найменування підприємства, де здійснювалось впровадження)

1. Вид впроваджених результатів Рекомендації щодо раціональних параметрів сепарації зернових сумішей за сукупністю фізико-механічних властивостей.

(експлуатація виробу, роботи, технології, виробництво виробу, роботи, технології, функціонування систем)

2. Характеристика масштабу впровадження універсальне

(унікальне, одиначне, партія, масове, серійне)

3. Форма впровадження:

Методика (метод) обґрунтування раціональних параметрів купки пшениці за фізико-механічними властивостями з отриманням високоякісної продукції та зменшення енерговитрат на процес сепарації.

4. Новизна результатів науково-дослідних робіт: розроблено якісно-нові процеси сепарації зернового матеріалу, процеси сепарації обґрунтовано вперше, результати нові.

(піонерські, принципово нові, якісно нові, модифікація, модернізація старих розробок)

5. Дослідно-промислова перевірка

(найменування підприємства, період)

6. Впроваджені:

- в промислове виробництво Фізична особа-підприємець Бойко Євген Володимирович

(дільниця, цех, процес)

- в проектні роботи

(вказати об'єкт, підприємство)

7. Річний економічний ефект (розрахунок додається)

очікуваний 60 тис. грн. Шістдесят тисяч грн. 00 коп

(від впровадження в проект)

фактичний 80 тис. грн. Вісімдесят тисяч грн. 00 коп

8. Соціальний і науково-технічний ефект: покращено умови праці операторів сепарувальних машин, зменшено забруднення навколишнього середовища, скорочено використання невідновлюваних природних ресурсів за рахунок економії електроенергії.

(охорона навколишнього середовища, надр, оздоровлення та покращення умов праці, удосконалення структури управління, науково-технічних напрямків, спеціальні призначення і т.п.)

ВІД ВИКОНАВЦЯ

Керівник роботи

(підпис)

Олексій БОГОМОЛОВ
(ініціали, прізвище)

ВІД ПІДПРИЄМСТВА

Фізична особа-підприємець

(підпис)

Євген БОЙКО
(ініціали, прізвище)

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ДЕРЖАВНИЙ БІОТЕХНОЛОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ



ПОГОДЖЕНО

Проректор з наукової роботи ДБТУ

М.П. «22» 2026 р. Валерій МИХАЙЛОВ



ЗАТВЕРДЖУЮ

Директор ТОВ «Компанія «Харчові технології»

М.П. «22» 2026 р. Олег ЧИВИЛЬОВ

А К Т

ВПРОВАДЖЕННЯ НАУКОВО-ДОСЛІДНОЇ РОБОТИ У ВИРОБНИЦТВО

Замовник ТОВ Компанія «Харчові технології»

Чивильов Олег Валерійович

(П.І.Б. керівника організації)

Цим актом підтверджується, що результати роботи, яку виконано на тему №55-23 -24Д
«Обґрунтування параметрів процесу сепарації зернових сумішей за сукупністю фізико-механічних властивостей»

(найменування теми, № держ. реєстрації)

на кафедрі Обладнання та інжинірингу переробних і харчових виробництв
вартістю 45000,00 грн (сорок п'ять тисяч грн 00 коп.)

(цифрами та прописом)

яка виконувалася з 05.12.2023р. по 31.05.2024р.

впроваджені ТОВ «Компанія «Харчові технології»

(найменування підприємства, де здійснювалось впровадження)

1. Вид впроваджених результатів: Рекомендації щодо раціональних параметрів сепарації насіння проса

(експлуатація виробу, роботи, технології; виробництво виробу, роботи, технології, функціонування систем)

2. Характеристика масштабу впровадження універсальне

(унікальне, одиначне, партія, масове, серійне)

3. Форма впровадження:

Методика (метод): Обґрунтування раціональних параметрів процесу сепарації насіння проса на гравітаційних сепараторах

4. Новизна результатів науково-дослідних робіт: розроблено якісно нові процеси сепарації насіння проса

(піонерські, принципово нові, якісно нові, модифікація, модернізація старих розробок)

5. Дослідно-промислова перевірка

(найменування підприємства, період)

6. Впроваджені:

- в промислове виробництво ТОВ «Компанія «Харчові технології»

(участок, цех/и, процес)

- в проектні роботи

(вказати об'єкт, підприємство)

7. Річний економічний ефект (розрахунок додається)

очікуваний 20960,3 тис. грн.

(від впровадження в проєкт)

фактичний 41920,6 тис. грн.

8. Соціальний і науково-технічний ефект

(охорона навколишнього середовища, надр; оздоровлення та покращення умов праці, удосконалення структури управління, науково-технічних напрямків, спеціальні призначення і т.п.)

ВІД ВИКОНАВЦЯ

Олександр БОГОМОЛОВ

ВІД ПІДПРИЄМСТВА

Олег ЧИВИЛЬОВ

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ДЕРЖАВНИЙ БІОТЕХНОЛОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ



ПОГОДЖЕНО

Проректор з наукової роботи ДБТУ

Валерій МИХАЙЛОВ
М.П. «13» 03 2026 р.



ЗАТВЕРДЖУЮ

Директор ТОВ «ЮР АГРО»

Юрій БЄЛЄВЦОВ
М.П. «13» 03 2026 р.

А К Т

ВІПРОВАДЖЕННЯ НАУКОВО-ДОСЛІДНОЇ РОБОТИ У ВИРОБНИЦТВО

Замовник ТОВ «ЮР АГРО»

Бєлевцов Юрій Олександрович

(П.І.Б. керівника організації)

Цим актом підтверджується, що результати роботи, яку виконано на тему №55-23-24Д
«Обґрунтування параметрів процесу сепарації зернових сумішей за сукупністю фізико-механічних властивостей»

(найменування теми, № держ. реєстрації)

на кафедрі Обладнання та інжинірингу переробних і харчових виробництв

вартістю 45000,00 грн (сорок п'ять тисяч грн 00 коп.)

(цифра та прописом)

яка виконувалася з 05.12.2023р. по 31.05.2024р.

впроваджені ТОВ «ЮР АГРО»

(найменування підприємства, де здійснювалось впровадження)

1. Вид впроваджених результатів: Рекомендації щодо раціональних параметрів сепарації насіння проса

(експлуатація виробу, роботи, технології; виробництво виробу, роботи, технології, функціонування систем)

2. Характеристика масштабу впровадження універсальне

(унікальне, одиночне, партія, масове, серійне)

3. Форма впровадження:

Методика (метод): Обґрунтування раціональних параметрів процесу сепарації насіння проса на гравітаційних сепараторах

4. Новизна результатів науково-дослідних робіт: розроблено якісно нові процеси сепарації насіння проса

(піонерські, принципово нові, якісно нові, модифікація, модернізація старих розробок)

5. Дослідно-промислова перевірка

(найменування підприємства, період)

6. Впроваджені:

- в промислове виробництво ТОВ «ЮР АГРО»

(участок, цех/н, процес)

- в проектні роботи

(вказати об'єкт, підприємство)

7. Річний економічний ефект (розрахунок додається)

очікуваний 20960,3 тис. грн.

(від впровадження в проект)

фактичний 41920,6 тис. грн.

8. Соціальний і науково-технічний ефект

(охорона навколишнього середовища, надр, оздоровлення та покращення умов праці, удосконалення структури управління, науково-технічних напрямків, спеціальні призначення і т.п.)

ВІД ВИКОНАВЦЯ

Олександр БОГОМОЛОВ
(ініціали, прізвище)

ВІД ПІДПРИЄМСТВА

Юрій БЄЛЄВЦОВ
(ініціали, прізвище)



УКРАЇНА

(19) UA

(11) 158522

(13) U

(51) МПК

G01N 19/02 (2006.01)

НАЦІОНАЛЬНИЙ ОРГАН
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ ВЛАСНОСТІ
ДЕРЖАВНА ОРГАНІЗАЦІЯ
"УКРАЇНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ
ОФІС ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ
ВЛАСНОСТІ ТА ІННОВАЦІЙ"

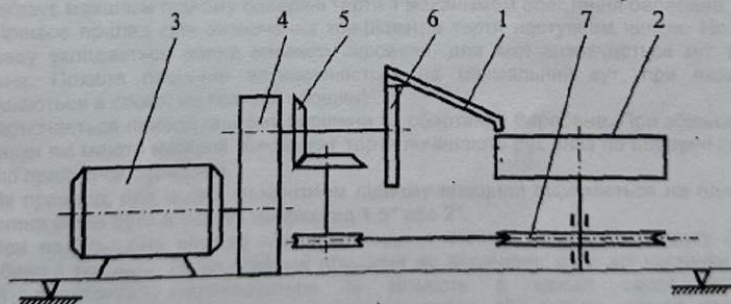
(12) ОПИС ДО ПАТЕНТУ НА КОРИСНУ МОДЕЛЬ

(21) Номер заявки:	u 2024 01911	(72) Винахідник(и):	Богомолов Олексій Васильович (UA), Михайлов Валерій Михайлович (UA), Богомолов Олександр Олексійович (UA), Загорулько Андрій Миколайович (UA), Савченко Олеся Миколаївна (UA), Бредихіна Кристина Олександрівна (UA), Михайлов Богдан Валерійович (UA)
(22) Дата подання заявки:	11.04.2024	(73) Володілець (володільці):	ДЕРЖАВНИЙ БІОТЕХНОЛОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ, вул. Алчевських, 44, м. Харків, 61002 (UA)
(24) Дата, з якої є чинними права інтелектуальної власності:	20.02.2025		
(46) Публікація відомостей про державну реєстрацію:	19.02.2025, Бюл.№ 8		

(54) ПРИЛАД ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ КОЕФІЦІЄНТІВ ТЕРТЯ СИПКИХ МАТЕРІАЛІВ

(57) Реферат:

Прилад для визначення коефіцієнтів тертя сипких матеріалів містить поверхню тертя, виконану з можливістю зміни кута нахилу, та приймачі продукту. Приймачі продукту виконані у вигляді барабана з радикальними секціями та встановлені з можливістю їх обертання навколо осі барабана. При цьому кулачковий механізм підйому поверхні тертя кінематично зв'язаний з механізмом обертання барабана через зубчасту та ланцюгову передачі.



Фіг. 1

UA 158522 U



УКРАЇНА

(19) **UA** (11) **162405** (13) **U**
 (51) МПК (2026.01)
 B07B 13/00

НАЦІОНАЛЬНИЙ ОРГАН
 ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ ВЛАСНОСТІ
 ДЕРЖАВНА ОРГАНІЗАЦІЯ
 "УКРАЇНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ
 ОФІС ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ
 ВЛАСНОСТІ ТА ІННОВАЦІЙ"

(12) ОПИС ДО ПАТЕНТУ НА КОРИСНУ МОДЕЛЬ

(21) Номер заявки:	u 2025 02908	(72) Винахідник(и):	Богомолов Олексій Васильович (UA), Богомолов Олександр Олексійович (UA), Ляшенко Богдан Віталійович (UA), Карпенко Людмила Костянтинівна (UA), Міленін Андрій Миколайович (UA), Кісь-Коркіщенко Лілія Вікторівна (UA), Бочарніков Ігор Олександрович (UA)
(22) Дата подання заявки:	17.06.2025	(73) Володілець (володільці):	ДЕРЖАВНИЙ БІОТЕХНОЛОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ, вул. Алчевських, 44, м. Харків, 61002 (UA)
(24) Дата, з якої є чинними права інтелектуальної власності:	26.03.2026		
(46) Публікація відомостей про державну реєстрацію:	25.03.2026, Бюл.№ 12		

(54) ГРАВІТАЦІЙНИЙ СЕПАРАТОР СИПКИХ СУМІШЕЙ ЗА ПРУЖНІСТЮ ТА КОЕФІЦІЄНТАМИ ТЕРТЯ**(57) Реферат:**

Гравітаційний сепаратор сипких сумішей за пружністю та коефіцієнтами тертя містить фрикційну похилу поверхню, встановлену з можливістю регулювання кута нахилу, живильник та приймачі продуктів розподілу. В нижній частині живильника встановлено похилий розгінний лоток, розташований перпендикулярно до поздовжньої осі фрикційної похилої поверхні з можливістю регулювання висоти його розміщення над фрикційною поверхнею.

U
162405
UA



УКРАЇНА

(19) UA (11) 158110 (13) U
 (51) МПК
 B07B 7/01 (2006.01)

НАЦІОНАЛЬНИЙ ОРГАН
 ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ ВЛАСНОСТІ
 ДЕРЖАВНА ОРГАНІЗАЦІЯ
 "УКРАЇНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ
 ОФІС ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ
 ВЛАСНОСТІ ТА ІННОВАЦІЙ"

(12) ОПИС ДО ПАТЕНТУ НА КОРИСНУ МОДЕЛЬ

(21) Номер заявки: u 2024 01912	(72) Винахідник(и): Богомолов Олексій Васильович (UA), Ірклієнко Віктор Іванович (UA), Михайлов Валерій Михайлович (UA), Богомолов Олександр Олексійович (UA), Загорулько Андрій Миколайович (UA), Михайлов Богдан Валерійович (UA), Загорулько Олексій Євгенович (UA)
(22) Дата подання заявки: 11.04.2024	
(24) Дата, з якої є чинними права інтелектуальної власності: 02.01.2025	
(46) Публікація відомостей про державну реєстрацію: 01.01.2025, Бюл.№ 1	(73) Володілець (володільці): ДЕРЖАВНИЙ БІОТЕХНОЛОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ, вул. Алчевських, 44, м. Харків, 61002 (UA)

(54) ЗДРІБНЮВАЧ РОСЛИННОЇ СИРОВИНИ

(57) Реферат:

Здрібнювач рослинної сировини містить робочу камеру, виконану у вигляді вертикального циліндра, в центральній частині якого встановлені ножі, що закріплені на роторі, привід та завантажувальний бункер. Ножі розміщені в декілька ярусів і виконані в поперечному перерізі у вигляді трапеції, встановленої меншою основою догори. Ножі кожного ярусу зміщені один від одного на кут, величина якого визначається за формулою:

$$a = \frac{360}{n \cdot k},$$

де n - кількість ножів в кожному ярусі,
 k - кількість ярусів.

U
 158110
 UA

(11) **162201**(19) **UA**(51) МПК
B07B 7/01 (2006.01)(21) Номер заявки: **u 2025 02921**(22) Дата подання заявки: **17.06.2025**(24) Дата, з якої є чинними
права інтелектуальної
власності: **05.03.2026**(46) Дата публікації відомостей
про державну реєстрацію
та номер Бюлетеня: **04.03.2026,
Бюл. № 9**(72) Винахідники:
**Богомолов Олексій
Васильович, UA,
Михайлов Валерій
Михайлович, UA,
Загорулько Андрій
Миколайович, UA,
Ірклієнко Віктор Іванович,
UA,
Богомолов Олександр
Олексійович, UA,
Михайлов Богдан
Валерійович, UA**(73) Володілець:
**ДЕРЖАВНИЙ
БІОТЕХНОЛОГІЧНИЙ
УНІВЕРСИТЕТ,
вул. Алчевських, 44, м. Харків,
61002, UA**

(54) Назва корисної моделі:

ЗДРІБНЮВАЧ ЗЕРНОВИХ СУМІШЕЙ

(57) Формула корисної моделі:

Здрібнювач зернових сумішей, що містить камеру здрібнення, виконану у вигляді вертикального циліндра, ножі трапецеїдальної форми, що закріплені на роторі у декілька ярусів, привод та завантажувальний пристрій, який відрізняється тим, що у верхньому ярусі ножі розміщені більшою основою вниз, а у нижчих ярусах - більшою основою вверх.