МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ДНІПРОВСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ АГРАРНО-ЕКОНОМІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

ГОЛОВЧЕНКО ВАЛЕНТИН ВОЛОДИМИРОВИЧ

УДК 621.927.1:634.75 (043.5)

ДИСЕРТАЦІЯ

ОБҐРУНТУВАННЯ КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ МАШИНИ ДЛЯ ОЧИЩЕННЯ НАСІННЯ РИЦИНИ

Галузь знань 13 – Механічна інженерія
133 – Галузеве машинобудування

Подається на здобуття освітньо-наукового ступеня доктора філософії

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



Валентин ГОЛОВЧЕНКО

Науковий керівник: Теслюк Геннадій Володимирович, кандидат технічних наук, доцент

Дніпро – 2026

АНОТАЦІЯ

Головченко В. В. Обґрунтування конструктивно-технологічних параметрів машини для очищення насіння рицини. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття освітньо-наукового ступеня доктора філософії (PhD) за спеціальністю 133 Галузеве машинобудування (13 «Механічна інженерія») – Дніпровський державний аграрно-економічний університет, Міністерство освіти та науки України, Дніпро, 2026.

Мета роботи – підвищення ефективності відокремлення і очищення насіння рицини шляхом обґрунтування технологічного процесу, параметрів і режимів роботи сепаратора-очисника на основі їх реологічних особливостей.

Об'єкт дослідження – технологічний процес очищення насіння рицини сепаратором-очисником.

Предмет досліджень – закономірності впливу параметрів машини для очищення насіння рицини на якість її роботи.

Методи досліджень. Теоретичні методи ґрунтувалися на аналізі та узагальненні науково-технічної літератури, патентно-інформаційному аналізі існуючих технологій і машин для післязбиральної обробки рицини, а також на застосуванні методів теоретичної механіки, механіки суцільних середовищ і реології для побудови математичних моделей процесів розлущування, відокремлення та очищення насіння. Експериментальні методи включали лабораторні випробування для визначення фізико-механічних і реологічних властивостей плодів, насіння та частинок коробочок рицини, а також стендові дослідження роботи розробленого сепаратора-очисника з варіюванням основних конструктивних і режимних параметрів. Чисельні методи дослідження реалізовано із застосуванням методу дискретних елементів (DEM) у поєднанні з CFD-моделюванням повітряного потоку в середовищі Simcenter Star-CCM+, з використанням контактних моделей Герца–Міндліна, обертального тертя та когезії для відтворення процесів деформації, руйнування і руху частинок у робочій зоні машини. Методи математичної

статистики та планування експерименту застосовано для обробки результатів досліджень, побудови рівнянь регресії, оцінювання значущості факторів і адекватності моделей. Оптимізацію конструктивно-технологічних параметрів виконано з використанням багатокритеріальних методів, зокрема скалярного ранжування з мінімізацією мультиплікативної цільової функції. Техніко-економічну ефективність запропонованих рішень оцінено за загальноприйнятими методиками економічного аналізу.

Уперше розроблено та верифіковано DEM–CFD модель процесів деформації, руйнування та переміщення плодів, насіння і частинок коробочок рицини в робочій зоні сепаратора-очисника з використанням контактних моделей Герца–Міндліна і когезійних взаємодій, що дозволило кількісно описати багатофазний характер руйнування оболонок.

Уперше встановлено аналітичні залежності продуктивності, якості відокремлення і очищення насіння рицини та енергоємності процесу від основних конструктивно-режимних параметрів сепаратора-очисника, що дало змогу визначити їх оптимальні значення.

Набули подальшого розвитку наукові положення щодо врахування реологічних і фізико-механічних властивостей насіння олійних культур під час проєктування машин для післязбиральної обробки, зокрема в частині їх впливу на процеси розлущування та аеродинамічної сепарації.

Набули подальшого розвитку інженерні принципи створення багатофункціональних машин для комплексної післязбиральної переробки насіння олійних культур, що поєднують механічні та пневматичні методи розділення матеріалу.

Рицина є перспективною біоенергетичною та промисловою культурою з високим потенціалом для сталого розвитку аграрного сектору України, однак її ефективне впровадження стримується недостатнім рівнем механізації та науково-технічного забезпечення післязбиральної обробки. Аналіз фізико-механічних властивостей плодів і насіння, технологій збирання та існуючих машин показав необхідність застосування спеціалізованого регульованого обладнання, здатного

враховувати варіативність морфологічних характеристик і мінімізувати пошкодження насіння. Обґрунтовано доцільність використання комбінованих технологій розлущування та очищення з аеродинамічною і решітною сепарацією, а також підтверджено перспективність поєднання експериментальних і чисельних методів моделювання (DEM–CFD) для оптимізації конструктивно-технологічних параметрів машин. Запропонована технологічна схема машини для очищення насіння рицини створює науково-інженерну основу для подальшої розробки, впровадження у виробництво та підвищення економічної й технологічної ефективності переробки рицини.

Запропонована конструкція машини для очищення насіння рицини дає змогу забезпечити комплексну післяжнивну переробку плодів рицини шляхом ефективного розлущування коробочок, відокремлення насіння та високоякісного очищення отриманого вороху від легких домішок, пилу та частинок коробочок. Завдяки поєднанню механічного подрібнення з системою аеродинамічного очищення досягається підвищення якості продукції та зменшення втрат насіння. Автоматизоване регулювання положення зворотного конусу за допомогою мотор-редуктора підвищує точність налаштувань і стабільність технологічного процесу. Додаткове оснащення машини блоком керування забезпечує автоматизацію окремих функціональних вузлів, поліпшує умови експлуатації, підвищує надійність роботи та зменшує вплив людського фактора під час роботи машини.

Для глибшого розуміння процесів руйнування плодів рицини і переміщення компонентів отриманої суміші доцільно застосувати метод дискретних елементів (DEM) у Simcenter Star-CCM+. DEM дозволяє моделювати рух і взаємодію частинок без припущень про континуум, відтворюючи відповідні мікроскопічні механізми. Плоди і насіння рицини моделювались, як скупчення сферичних частинок, рух яких розраховується за рівняннями Ньютона з урахуванням контактних сил і моментів, описаних моделями Герца-Міндліна, обертального тертя з постійним напрямком моменту (CDT) та спрощеною моделлю когезії Джонсона-Кендалла-Робертса (SJKR). Чисельне моделювання процесу руйнування плодів і насіння рицини під дією стискаючого навантаження, виконане на основі схеми з урахуванням фізико-

механічних і реологічних властивостей біоматеріалу, дозволило детально проаналізувати етапи деформації та руйнування цих об’єктів. Встановлено, що руйнування має багатофазну природу і включає три основні стадії: пружну деформацію, втрату структурної цілісності (з утворенням тріщин і фрагментацією) та ущільнення залишків. Для плодів рицини характерне поступове зростання сили до пікового значення, плато та різке зменшення опору після руйнування, тоді як насіння демонструє різкий спад сили після досягнення критичного навантаження з подальшим її відновленням через ущільнення залишків. Залежності сили стиску від часу, отримані в результаті чисельного моделювання, повністю узгоджуються з даними лабораторних випробувань, що підтверджує достовірність моделі та обґрунтовує її застосування для подальшого оптимізаційного аналізу й проєктування конструктивно-технологічних параметрів машин для очищення насіння рицини.

Створена математична модель, з використанням якої обґрунтовано розміри робочої зони машини для очищення насіння рицини: діаметри і висоти дробильного та зворотного конусів (480, 520 і 220–240 мм відповідно), початковий зазор (20 мм), амплітуду ходу (10–15 мм) та кут нахилу (0–4°), які забезпечують ефективне багатоетапне стиснення плодів рицини з довжиною до 18 мм без пошкодження насіння. При цьому максимальний тиск формується у зоні мінімального зазору, а мінімальний – у зоні найбільшого розкриття, що відповідає змінному характеру контакту. В результаті чисельного моделювання процесу відокремлення насіння рицини отримані залежності продуктивності розробленої машини Q, частки нерозлущених плодів (сегментів) ξ_f від відстані між зворотнім і дробильним конусами δ, частоти обертання дробильного конусу n, діаметра отвору подачі D_{in} і кута нахилу осі дробильного конусу γ. В результаті чисельного моделювання процесу очищення насіння рицини отримано залежність вмісту ліквідного насіння у забірнику $\psi_{s\text{-}s}$ від подачі (продуктивність відокремлення насіння) Q, кута нахилу решета β і швидкості повітряного потоку V. Статистичний аналіз отриманих рівнянь регресії дав змогу оцінити внесок кожного з досліджуваних факторів у формування цільових показників роботи машини, виокремити статистично значущі параметри та

побудувати достовірні аналітичні моделі процесу. Використання методу скалярного ранжування з мінімізацією мультиплікативної цільової функції в середовищі Wolfram Cloud дало змогу визначити оптимальні значення факторів (δ = 8,6 мм; n = 291 об/хв; D_{in} = 98 мм; γ = 3,6°; β = 20,3 °; V = 6 м/с), за яких досягається максимальна продуктивність процесу (Q = 150,7 кг/год) при забезпеченні прийнятного рівня якості відокремлення (ξ_f = 0,141) та очищення $\psi_{s\text{-}s}$ = 0,956. Отримані результати підтверджують ефективність запропонованої конструкції машини та доцільність її впровадження у виробничих умовах.

В результаті лабораторних досліджень на спеціалізованому обладнанні встановлено основні фізико-механічні властивості плодів рицини та їх складових (сегментів, насіння і частинок коробочки), зокрема геометричні розміри (довжина L та ширина B), масу M, насипну ρ_b та дійсну ρ_d щільність, кут природного укосу φ, коефіцієнти тертя (ковзання $\mu`$ та спокою μ) та швидкість витання V. Виявлено, що насіння має найвищу дійсну щільність (567 ± 54 кг/м³) і найнижчі коефіцієнти тертя, що забезпечує його кращу сипучість і рухливість у технологічних процесах. Плоди характеризуються найбільшою масою (1,18 ± 0,13 г) і швидкістю витання (11,75 ± 1,43 м/с), що впливає на методи їхнього очищення та сортування. Частинки коробочки мають найменшу щільність (101 ± 17 кг/м³) і найнижчу швидкість витання (3,21 ± 0,51 м/с), що дозволяє ефективно їх відокремлювати аеродинамічними методами. Отримані результати використані під час чисельного моделювання машини для очищення насіння рицини. Дослідження реологічних властивостей плодів і насіння рицини показало, що їх механічна поведінка при стисканні має виражену нелінійну залежність від часу та абсолютної деформації. Аналіз отриманих залежностей сили стиску F від часу t (абсолютної деформації Δx) свідчить, що процес деформації плодів рицини включає кілька послідовних етапів: початкове лінійне зростання сили в межах пружної деформації, момент розтріскування оболонки (F_{f1} = 63,67 ± 3,52 Н, Δx_{f1} = 3,32 ± 0,75 мм), уповільнення росту сили у фазі пластичної деформації, різкий спад при руйнуванні оболонки (F_{f2} = 172,96 ± 9,55 Н, Δx_{f2} = 7,19 ± 0,79 мм) та подальше плавне зростання сили під час стискання внутрішньої частини плоду. Подібний характер деформації

спостерігається і для насіння рицини, однак момент руйнування (F_{s2} = 48,91 ± 8,34 Н, Δx_{s2} = 2,4 ± 0,62 мм) супроводжується різким зниженням сили без вираженої стадії пластичної деформації. Статистична обробка експериментальних даних підтвердила відповідність розподілів сил і деформацій нормальному закону розподілу.

В результаті експериментальних досліджень процесу відокремлення і очищення насіння рицини отримані залежності продуктивності розробленої машини Q, споживаної потужності P, питомих витрат електроенергії E, частки нерозлущених плодів (сегментів) ξ_f, вмісту ліквідного насіння у забірнику $\psi_{s\text{-}s}$ від відстані між зворотнім і дробильним конусами δ, частоти обертання дробильного конусу n і швидкості повітряного потоку V. Проведений статистичний аналіз регресійних рівнянь дозволив визначити вплив кожного з досліджуваних факторів на цільові показники роботи машини, виявити значущі параметри та побудувати адекватні аналітичні моделі. Застосування методу скалярного ранжування з мінімізацією мультиплікативної функції в середовищі Wolfram Cloud дало змогу встановити оптимальні поєднання значень факторів (δ = 10,8 мм; n = 282 об/хв; V = 3,6 м/с), які забезпечують максимальну ефективність процесу, з урахуванням сукупності технологічних (якісних) і енергетичних критеріїв (E = 0,0394 МДж/кг; Q = 163,4 кг/год; P = 1861 Вт; ξ_f = 0,099; $\psi_{s\text{-}s}$ = 0,958). Отримані результати підтверджують доцільність подальшого впровадження запропонованої конструкції машини для очищення насіння рицини у виробничу практику. Порівняння результатів чисельного моделювання та експериментальних досліджень процесу відокремлення і очищення насіння рицини показало задовільну узгодженість за основними показниками роботи машини: продуктивністю Q, часткою нерозлущених плодів ξ_f та вмістом ліквідного насіння у забірнику $\psi_{s\text{-}s}$. Для продуктивності коефіцієнт кореляції між чисельною та експериментальною моделями склав 0,89, для частки нерозлущених плодів – 0,85, для вмісту ліквідного насіння – 0,78. Чисельні моделі враховують ширший спектр факторів, що дозволяє детальніше описати процес, тоді як експериментальні залежності спрощені, але підтверджують основні закономірності. Отримані результати свідчать про адекватність розроблених

математичних моделей та їх придатність для прогнозування роботи машини і оптимізації процесу очищення насіння рицини.

Проведене техніко-економічне оцінювання показало, що розроблена машина для очищення насіння рицини, яка поєднує в одному агрегаті операції розлущування плодів і очищення насіння, є економічно доцільною та конкурентоспроможною порівняно з базовою системою з двох машин (Lerford Machine LLC RX-200 та СС-1 ТОВ НВО «Сортувальні машини»). Незважаючи на вищу балансову вартість, розроблений варіант забезпечує зниження загальних питомих витрат з 56,916 до 50,564 грн/кг за рахунок зменшення втрат ліквідного насіння та скорочення витрат на оплату праці. Питомий економічний ефект становить 6,351 грн/кг переробленої сировини, а строк окупності капітальних вкладень дорівнює 1,18 року, що підтверджує доцільність впровадження розробленої машини у виробничих умовах.

Ключові слова: рицина, плід, насіння, лушпиння, насіннєва суміш, зернова суміш, зерновий матеріал, зерно, домішки, олійні культури, сипучі матеріали, частинка, фізико-механічні властивості, геометричні розміри, щільність, реологія, деформація, стиск, руйнування, опір, ущільнення, аеродинамічні властивості, лущення, поділ, сепарація, очищення, сортування, процеси, пневмосепарація, аеродинамічне очищення, післязбиральна обробка, технологічна схема, машина, обладнання, сільськогосподарська техніка, зерноочисні машини, сепаратор, решето, пневматичний канал, дробильний конус, робочий орган, швидкість, потік повітря, потік, поле швидкостей, траєкторія руху, динаміка руху, усталений режим, стійкість руху, експеримент, дослідження, експериментальна установка, метод, моделювання, метод дискретних елементів, модель Герца-Міндліна, математична модель, критеріальне рівняння, регресійна модель, параметри, оптимізація, інтенсифікація, продуктивність, ефективність, енергоефективність, питома енергія, якість, пошкодження.

ANNOTATION

Holovchenko V.V. Justification of the design and technological parameters of a machine for cleaning castor bean seeds. – Qualifying scientific work on the rights of the manuscript.

Dissertation for the degree of Doctor of Philosophy (PhD) in specialty 133 «Industrial Engineering» (13 «Mechanical Engineering») – Dnipro State Agrarian and Economic University, Ministry of Education and Science of Ukraine, Dnipro – 2026.

Purpose of the study is to increase the efficiency of separation and cleaning of castor seeds by substantiating the technological process, parameters, and operating modes of the separator–cleaner based on their rheological characteristics.

Object of the study is the technological process of castor seed separation using a separator–cleaner.

Subject of the study is the regularities of the influence of the parameters and operating modes of the castor seed cleaning machine on its performance quality.

Research methods. Theoretical methods were based on the analysis and generalization of scientific and technical literature, patent and information analysis of existing technologies and machines for post-harvest processing of castor crops, as well as the application of methods of theoretical mechanics, continuum mechanics, and rheology to develop mathematical models of the processes of shelling, separation, and cleaning of seeds. Experimental methods included laboratory tests to determine the physical, mechanical, and rheological properties of castor fruits, seeds, and capsule particles, as well as bench tests of the developed separator–cleaner with variation of the main design and operating parameters. Numerical research methods were implemented using the Discrete Element Method (DEM) in combination with CFD modeling of the airflow in the Simcenter Star-CCM+ environment, employing Hertz–Mindlin contact models, rolling friction, and cohesion to reproduce the processes of deformation, fracture, and particle motion in the working zone of the machine. Methods of mathematical statistics and design of experiments were applied to process the research results, construct regression equations, and evaluate factor significance and model adequacy. Optimization of design and

technological parameters was carried out using multicriteria methods, in particular scalar ranking with minimization of a multiplicative objective function. The techno-economic efficiency of the proposed solutions was assessed using generally accepted methods of economic analysis.

For the first time, a DEM–CFD model of the processes of deformation, fracture, and transport of castor fruits, seeds, and capsule particles in the working zone of the separator–cleaner was developed and verified using Hertz–Mindlin contact models and cohesive interactions, which made it possible to quantitatively describe the multiphase nature of shell fracture.

For the first time, analytical relationships were established between the productivity, quality of separation and cleaning of castor seeds, and the energy intensity of the process and the main design and operating parameters of the separator–cleaner, which enabled the determination of their optimal values.

The scientific principles related to accounting for the rheological and physical–mechanical properties of oilseed crops in the design of post-harvest processing machines were further developed, particularly regarding their influence on shelling and aerodynamic separation processes.

The engineering principles for designing multifunctional machines for integrated post-harvest processing of oilseed crops that combine mechanical and pneumatic material separation methods were further developed.

Castor bean is a promising bioenergy and industrial crop with high potential for the sustainable development of Ukraine’s agricultural sector; however, its effective implementation is constrained by an insufficient level of mechanization and scientific–technical support for post-harvest processing. An analysis of the physical and mechanical properties of fruits and seeds, harvesting technologies, and existing machines has demonstrated the need for specialized adjustable equipment capable of accounting for the variability of morphological characteristics and minimizing seed damage. The feasibility of using combined shelling and cleaning technologies with aerodynamic and sieve separation has been substantiated, and the prospects of integrating experimental and numerical modeling methods (DEM–CFD) for optimizing the design and technological

parameters of machines have been confirmed. The proposed technological scheme of a castor seed cleaning machine provides a scientific and engineering basis for further development, industrial implementation, and improvement of the economic and technological efficiency of castor processing.

The proposed design of the castor seed cleaning machine enables comprehensive post-harvest processing of castor fruits through effective capsule shelling, seed separation, and high-quality cleaning of the resulting bulk material from light impurities, dust, and capsule particles. By combining mechanical crushing with an aerodynamic cleaning system, product quality is improved and seed losses are reduced. Automated adjustment of the reverse cone position using a geared motor increases setting accuracy and ensures process stability. Additional equipment of the machine with a control unit enables automation of individual functional units, improves operating conditions, enhances reliability, and reduces the influence of the human factor during machine operation.

For a deeper understanding of the processes of castor fruit destruction and the movement of components of the resulting mixture, it is advisable to apply the Discrete Element Method (DEM) in Simcenter Star-CCM+. DEM makes it possible to model particle motion and interaction without continuum assumptions, reproducing the corresponding microscopic mechanisms. Castor fruits and seeds were modeled as agglomerations of spherical particles whose motion is calculated using Newton’s equations, taking into account contact forces and moments described by the Hertz–Mindlin models, constant-direction torque rolling friction (CDT), and a simplified Johnson–Kendall–Roberts (SJKR) cohesion model. Numerical simulation of the destruction process of castor fruits and seeds under compressive loading, performed using a scheme that accounts for the physical–mechanical and rheological properties of the biomaterial, made it possible to analyze in detail the stages of deformation and failure of these objects. It was established that destruction has a multiphase nature and includes three main stages: elastic deformation, loss of structural integrity (with crack formation and fragmentation), and compaction of residues. Castor fruits are characterized by a gradual increase in force to a peak value, a plateau, and a sharp decrease in resistance after fracture, whereas seeds exhibit a sharp force drop after reaching the critical load followed by its recovery due to

residue compaction. The force–time relationships obtained from numerical simulations fully agree with laboratory test data, confirming the validity of the model and substantiating its application for further optimization analysis and design of the structural and technological parameters of castor seed cleaning machines.

A mathematical model was developed, based on which the dimensions of the working zone of the castor seed cleaning machine were substantiated: the diameters and heights of the crushing and reverse cones (480, 520, and 220–240 mm, respectively), the initial gap (20 mm), stroke amplitude (10–15 mm), and inclination angle (0–4°), which ensure effective multistage compression of castor fruits up to 18 mm in length without seed damage. In this case, the maximum pressure is formed in the zone of the minimum gap, and the minimum pressure in the zone of the maximum opening, corresponding to the variable nature of contact. As a result of numerical simulation of the castor seed separation process, relationships were obtained between the productivity of the developed machine Q, the fraction of unshelled fruits (segments) ξ_f, and the distance between the reverse and crushing cones δ, the rotational speed of the crushing cone n, the inlet opening diameter Din, and the inclination angle of the crushing cone axis γ. Numerical simulation of the castor seed cleaning process yielded the dependence of the content of marketable seeds in the collector $\psi_{s\text{-}s}$ on the feed rate (seed separation productivity) Q, sieve inclination angle β, and airflow velocity V. Statistical analysis of the obtained regression equations made it possible to assess the contribution of each studied factor to the formation of the target performance indicators of the machine, identify statistically significant parameters, and construct reliable analytical process models. The use of the scalar ranking method with minimization of a multiplicative objective function in the Wolfram Cloud environment made it possible to determine the optimal values of the factors (δ = 8.6 mm; n = 291 rpm; Din = 98 mm; γ = 3.6°; β = 20.3°; V = 6 m/s), at which the maximum process productivity (Q = 150.7 kg/h) is achieved while ensuring an acceptable level of separation quality (ξ_f = 0.141) and cleaning quality ($\psi_{s\text{-}s}$ = 0.956). The obtained results confirm the effectiveness of the proposed machine design and the feasibility of its implementation under production conditions.

As a result of laboratory studies conducted using specialized equipment, the main physical and mechanical properties of castor fruits and their components (segments, seeds, and capsule particles) were determined, including geometric dimensions (length L and width B), mass M, bulk density ρ_b, true density ρ_d, angle of repose φ, friction coefficients (sliding μ' and static μ), and terminal velocity V. It was found that seeds have the highest true density (567 ± 54 kg/m³) and the lowest friction coefficients, which ensures better flowability and mobility in technological processes. Fruits are characterized by the greatest mass (1.18 ± 0.13 g) and terminal velocity (11.75 ± 1.43 m/s), which affects the methods of their cleaning and sorting. Capsule particles have the lowest density (101 ± 17 kg/m³) and the lowest terminal velocity (3.21 ± 0.51 m/s), which allows them to be effectively separated by aerodynamic methods. The obtained results were used in numerical modeling of the castor seed cleaning machine. The study of the rheological properties of castor fruits and seeds showed that their mechanical behavior under compression exhibits a pronounced nonlinear dependence on time and absolute deformation. Analysis of the obtained compression force F versus time t (absolute deformation Δx) dependencies indicates that the deformation process of castor fruits includes several successive stages: an initial linear increase in force within elastic deformation, the moment of shell cracking (F_{f1} = 63.67 ± 3.52 N, Δx_{f1} = 3.32 ± 0.75 mm), a slowdown in force growth during the plastic deformation phase, a sharp drop during shell fracture (F_{f2} = 172.96 ± 9.55 N, Δx_{f2} = 7.19 ± 0.79 mm), and a subsequent gradual increase in force during compression of the inner part of the fruit. A similar deformation pattern is observed for castor seeds; however, the moment of fracture (F_{s2} = 48.91 ± 8.34 N, Δx_{s2} = 2.4 ± 0.62 mm) is accompanied by a sharp force decrease without a pronounced plastic deformation stage. Statistical processing of the experimental data confirmed that the distributions of forces and deformations follow a normal distribution law.

As a result of experimental studies of the castor seed separation and cleaning process, dependencies were obtained for the productivity of the developed machine Q, consumed power P, specific energy consumption E, fraction of unshelled fruits (segments) ξ_f, and content of marketable seeds in the collector $\psi_{s\text{-}s}$ on the distance between the reverse and crushing cones δ, the rotational speed of the crushing cone n, and the airflow velocity

V. Statistical analysis of the regression equations made it possible to determine the influence of each studied factor on the target performance indicators of the machine, identify significant parameters, and construct adequate analytical models. The application of the scalar ranking method with minimization of a multiplicative function in the Wolfram Cloud environment allowed establishing optimal combinations of factor values (δ = 10.8 mm; n = 282 rpm; V = 3.6 m/s) that ensure maximum process efficiency, taking into account a set of technological (quality) and energy criteria (E = 0.0394 MJ/kg; Q = 163.4 kg/h; P = 1861 W; ξ_f = 0.099; $\psi_{s\text{-}s}$ = 0.958). The obtained results confirm the feasibility of further implementation of the proposed castor seed cleaning machine design in production practice. Comparison of the results of numerical modeling and experimental studies of the castor seed separation and cleaning process showed satisfactory agreement for the main machine performance indicators: productivity Q, fraction of unshelled fruits ξ_f, and content of marketable seeds in the collector $\psi_{s\text{-}s}$. For productivity, the correlation coefficient between the numerical and experimental models was 0.89; for the fraction of unshelled fruits, 0.85; and for the content of marketable seeds, 0.78. Numerical models account for a wider range of factors, enabling a more detailed description of the process, whereas experimental relationships are simplified but confirm the main regularities. The obtained results indicate the adequacy of the developed mathematical models and their suitability for predicting machine performance and optimizing the castor seed cleaning process.

The conducted techno-economic assessment showed that the developed castor seed cleaning machine, which combines fruit shelling and seed cleaning operations in a single unit, is economically feasible and competitive compared to the baseline system consisting of two machines (Lerford Machine LLC RX-200 and SS-1 by NVO “Sorting Machines” LLC). Despite a higher balance-sheet cost, the developed option provides a reduction in total specific costs from 56.916 to 50.564 UAH/kg due to reduced losses of marketable seeds and lower labor costs. The specific economic effect amounts to 6.351 UAH/kg of processed raw material, and the payback period of capital investments is 1.18 years, which confirms the feasibility of implementing the developed machine under production conditions.

Keywords: castor bean, fruit, seed, husk, seed mixture, grain mixture, grain material, grain, impurities, oil crops, bulk materials, particle, physical and mechanical properties, geometric dimensions, density, rheology, deformation, compression, fracture, resistance, compaction, aerodynamic properties, dehulling, separation, cleaning, sorting, processes, pneumatic separation, aerodynamic cleaning, post-harvest processing, technological scheme, machine, equipment, agricultural machinery, grain cleaning machines, separator, sieve, pneumatic channel, crushing cone, working body, velocity, airflow, flow, velocity field, motion trajectory, motion dynamics, steady-state regime, motion stability, experiment, research, experimental setup, method, modeling, discrete element method, Hertz–Mindlin model, mathematical model, criterion equation, regression model, parameters, optimization, intensification, productivity, efficiency, energy efficiency, specific energy, quality, damage

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА, В ЯКИХ ОПУБЛІКОВАНІ ОСНОВНІ НАУКОВІ РЕЗУЛЬТАТИ ДИСЕРТАЦІЇ

Стаття у закордонному журналах, що індексуються в наукометричній базі Scopus:

1. Aliiev, E., **Holovchenko, V.**, Aliieva O. (2026). Research on the Optimal Design and Process Parameters of a Castor Seed Cleaning Machine. Research in Agricultural Engineering, 72(1): 41–58. https://doi.org/10.17221/121/2025-RAE

Статті у наукових фахових виданнях України за спеціальністю 133 Галузеве машинобудування:

2. Теслюк, Г.В., **Головченко, В.В.** (2025). Аналіз конструктивних особливостей машин для очищення насіння рицини. Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки, 11(42), I: 167–176. DOI: https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.11(42).1.167-178

3. Aliiev, E., **Holovchenko, V.** (2025). Results of laboratory studies on the physico-mechanical properties of castor fruits and seeds. Техніка, енергетика, транспорт АПК, 1 (128): 7–15. DOI: https://doi.org/10.37128/2520-6168-2025-1-1

4. Aliiev, E., **Holovchenko, V.** (2025). Results of experimental studies of a castor seed cleaning machine. Техніка, енергетика, транспорт АПК, 2 (129): 47–53 DOI: https://doi.org/10.37128/2520-6168-2025-2-6

5. Алієв, Е.Б., Теслюк, Г.В., **Головченко, В.В.** (2025). Чисельне моделювання машини для відокремлення і очищення насінин рицини від плодів. Сільськогосподарські машини, 51: 147–158. DOI: https://doi.org/10.36910/acm.vi51.1853

Статті у наукових фахових виданнях України за іншими спеціальностями:

6. Aliiev, E. B., Aliieva, O. Y., & **Holovchenko, V. V.** (2026). Verification of the rheological model of fracture of castor fruits and seeds based on experimental data.

Scientific and Technical Bulletin of the Institute of Oilseed Crops NAAS, 40, 145-158. https://doi.org/10.36710/IOC-2026-40-12

Патенти України:

7. Алієв, Е.Б., **Головченко, В.В.** (2025). Патент на корисну модель України 161299, МПК (2025.01) B01D 45/00, B01D 45/18 (2006.01). Машина для очищення насіння рицини. Заявник: Дніпровський державний аграрно-економічний університет, № u 2025 03080. Заявл. 25.06.2025. Опубл. 19.11.2025, Бюл. № 47. URL: https://sis.nipo.gov.ua/uk/search/detail/1886373/

Тези і матеріали конференцій:

8. **Головченко, В.В.** (2024). Перспективи розробки машини для очищення насіння рицини. Збірник тез III Всеукраїнської науково-практичної конференції молодих вчених «Інжиніринг технологій і технічних систем агропромислового комплексу» (15 листопада 2024 р.). Частина 2. Інноваційні технології харчової промисловості. Дніпро, ДДАЕУ: 112–114.

9. Алієв, Е.Б., **Головченко, В.В.** (2025). Результати лабораторних досліджень фізико-механічних властивостей плодів рицини та його складових. Збірник тез доповідей X Міжнародної науково-практичної конференції «Інноваційні технології в АПК» (3-4 квітня 2025 р.). Луцьк, ЛНТУ: 6–8.

10. **Holovchenko, V.V.** (2025). Analysis of the technological line for castor seed production. Збірник тез Міжнародної наукової інтернет-конференції «Олійні культури: сьогодення та перспективи» (26 березня 2025 р.). Запоріжжя, ІОК НААН: 137–138.

11. **Головченко, В.В.** (2025). Класифікація машин для очищення і сепарації насіння рицини. Матеріали I Всеукраїнської науково-практичної конференції «Здобутки та перспективи розвитку харчової галузі» (30 травня 2025 р.). Дніпро. ДДАЕУ: 75–77.

12. Алієв, Е.Б., **Головченко, В.В.** (2025). Огляд технологій збирання і очищення рицини. Збірник матеріалів II Міжнародної науково–практичної

конференції «Сучасні підходи до вирощування та використання малопоширених плодових, декоративних, ароматичних та лікарських рослин для покращення екологічної ситуації в Україні» (29 серпня 2025 р.). Одеса, ІКОСГ НААН: 65–68.

13. Алієв, Е.Б., **Головченко, В.В.** (2025). Розробка конструкції машини для очищення насіння рицини. Матеріали XX Міжнародної науково-практичної конференції «Технічний прогрес в АПК» (21–22 травня 2025 р.). Харків, ДБТУ: 103–105.

14. Алієв Е., **Головченко В.** (2025). Результати лабораторних досліджень реологічних властивостей плодів і насіння рицини. Збірник тез доповідей Міжнародної науково-практичної конференції «Інновації в агропромисловому комплексі, машинобудуванні та транспорті» (9–10 квітня 2025 року). Рівне, НУВГП: 71–74.

15. **Головченко, В.В.**, Алієв, Е.Б., Теслюк, Г.В. (2025). Результати експериментальних досліджень процесу відокремлення і очищення насіння рицини. Збірник тез доповідей XXVI Міжнародна наукова конференція «Сучасні проблеми землеробської механіки» (17–18 жовтня 2025 р.). Київ, НУБіП: 195–198.

16. **Головченко, В. В.** (2025). Теоретичні дослідження стиску плодів рицини під дією робочих органів машини. Інжиніринг технологій і технічних систем агропромислового комплексу. Збірник тез IV Всеукраїнської науково-практичної конференції молодих вчених (21 листопада 2025 р.). Частина 1. Інжиніринг технічних систем агропромислового виробництва. Дніпро. ДДАЕУ: 221–225.

ЗМІСТ

ВСТУП 21
1 СТАН ПИТАННЯ. МЕТА ТА ЗАВДАННЯ ДОСЛІДЖЕНЬ 28
1.1 Народногосподарське значення рицини 28
1.2 Аналіз фізико-механічних властивостей плодів і насіння рицини 31
1.3 Огляд технологій збирання і очищення рицини 33
1.4 Аналіз конструкцій машин для відокремлення і очищення насіння сільськогосподарських культур 37
1.5 Огляд основних результатів досліджень процесів відокремлення і очищення насіння сільськогосподарських культур 55
1.6 Висновки до розділу. Мета та завдання досліджень 61
2 ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ВІДОКРЕМЛЕННЯ І ОЧИЩЕННЯ НАСІННЯ РИЦИНИ 65
2.1 Постановка задачі 65
2.2 Обґрунтування конструктивно-технологічної схеми машини для очищення насіння рицини 66
2.3 Фізико-математичний апарат чисельного моделювання процесу відокремлення і очищення насіння рицини 70
2.4 Чисельне моделювання процесу руйнування плодів і насіння рицини стиском 77
2.5 Теоретичні дослідження стиску плодів рицини під дією робочих органів машини 85
2.6 Чисельне моделювання процесу відокремлення і очищення насінин рицини від плодів під дією робочих органів машини 90
2.7 Висновки до розділу 109
3 ПРОГРАМА І МЕТОДИКА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ПРОЦЕСУ ОЧИЩЕННЯ НАСІННЯ РИЦИНИ 112
3.1 Мета і задачі експериментальних досліджень 112

3.2 Методика лабораторних досліджень фізико-механічних властивостей плодів рицини та їх складових 113
3.3 Розробка стенду для дослідження машини для очищення насіння рицини 120
3.4 Методика експериментальних досліджень машини для очищення насіння рицини 125
3.5 Методика статистичної обробки експериментальних даних 129
3.6 Висновки з розділу 131
4 АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ПРОЦЕСУ ОЧИЩЕННЯ НАСІННЯ РИЦИНИ 133
4.1 Результати лабораторних досліджень фізико-механічних властивостей плодів рицини та їх складових 133
4.2 Результати експериментальних досліджень процесу відокремлення і очищення насіння рицини 145
4.3 Оптимізація конструктивно-технологічних параметрів машини для очищення насіння рицини 156
4.4 Порівняння результатів експериментальних досліджень і чисельного моделювання 157
4.5 Висновки до розділу 160
5 РЕАЛІЗАЦІЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕНЬ 163
5.1 Впровадження результатів досліджень 163
5.2 Визначення економічної ефективності машини для очищення насіння рицини 165
5.3 Висновки з розділу 167
ВИСНОВКИ 168
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ 173
ДОДАТКИ 195

ВСТУП

Актуальність. Згідно з останніми директивами щодо біоекономіки, виданими Європейським Союзом, промисловий сектор повинен більше покладатися на матеріали біологічного походження замість традиційних нафтових ресурсів [1, 2, 3], а аграрний сектор може сприяти досягненню цієї мети шляхом покращення використання продуктів переробки з олійних культур [4, 5]. Однак вирощування технічних культур викликає занепокоєння щодо використання земель і, як наслідок, конкуренції між продовольчими та непродовольчими культурами [6]. Можливість вирощування технічних культур на малопродуктивних землях може стати найкращим компромісом для досягнення майбутніх енергетичних цілей ЄС без скорочення земель, доступних для виробництва продовольства [7, 8]. Таким чином, варто досліджувати ланцюги створення доданої вартості культур із низькими вимогами до ресурсів, щоб вирішити поточні проблеми для їх масштабного впровадження.

З урахуванням цього рицина (Ricinus communis L.) є перспективною непродовольчою культурою [9, 10], яку можна вирощувати в умовах низького рівня ресурсного забезпечення в Україні, досягаючи врожайності насіння 1,6–1,8 т/га (сорт Олеся), 1,7-2,1 т/га (сорт Хортичанка), 1,5-1,7 т/га (сорт Хортицька 3) [11, 12, 13, 14]. Крім того, рицинову олію можна використовувати для різних цілей, таких як виробництво біодизеля, косметики, фармацевтичних препаратів, фарб, лаків, мастил для двотактних двигунів або компонентів напівжорсткої піни для термоізоляції [15, 16, 17, 18, 19]. Її внесок у зменшення залежності ЄС і України від імпорту рослинної олії для промислових і енергетичних цілей може бути відчутним, якщо буде належним чином розвинуто ефективний внутрішній ланцюг постачання рицинової олії.

Ricinus communis L. відома багатьма дикими та напівкультурними типами, які відрізняються генетичними та фенотипічними характеристиками, досягаючи висоти, подібної до середнього дерева [20]. У рицини насіння росте всередині капсул, розташованих на одній або декількох китицях, які розвиваються поступово

протягом життя рослини. Внаслідок цього дозрівання насіння на китицях є неоднорідним [21, 22, 23]. Це ускладнює механізацію збирання насіння рицини, і на ринку досі бракує спеціалізованих машин. Тому насіння доводиться збирати вручну, що збільшує витрати на виробництво рицинової олії та пов'язаних із нею побічних продуктів. Ручне збирання для насіннєвого матеріалу високих репродукцій є доцільним через невеликі об'єми [24, 25]. Однак виникає технічна задача виділення і очищення насіння рицини з плодів (капсул). Існуюче обладнання для обрушення, шеретування, очищення насіння інших культур [26, 27, 28, 29] не можна використовувати через високу ймовірність травмування насіння рицини. Це пов'язано з відмінностями реологічних властивостей від інших культур [30, 31, 32]. Тому актуальною науково-прикладною задачею є розробка машини для очищення насіння рицини і обґрунтування її конструктивно-технологічних параметрів.

Зв'язок роботи з науковими програмами. Дослідження, що стали основою дисертації, проведені в Дніпровському державному аграрно-економічному університеті (ДДАЕУ) в рамках науково-технічних робіт «Підвищення рівня енергетичних засобів сільськогосподарського призначення шляхом розробки та впровадження новітніх технологій господарювання в умовах обмеженості ресурсів» (№ ДР 0117U004545, 2022–2024 рр.) та «Інтенсифікація техніко-технологічного забезпечення процесів переробки насіння малопоширених (нішевих) олійних культур» (№ ДР 0125U000488, 2025–2026 рр.).

Метою досліджень є підвищення ефективності відокремлення і очищення насіння рицини шляхом обґрунтування технологічного процесу, параметрів і режимів роботи сепаратора-очисника на основі їх реологічних особливостей.

Для досягнення поставленої мети висунуто **наукову гіпотезу**, згідно з якою підвищення ефективності відокремлення і очищення насіння рицини може бути досягнуте за умови реалізації комбінованого технологічного процесу, що поєднує контрольоване багатоступеневе механічне розлущування плодів із подальшою решітно-аеродинамічною сепарацією, параметри і режими якої обґрунтовані з урахуванням реологічних та фізико-механічних властивостей плодів, насіння і

частинок коробочок, а також оптимізовані на основі поєднання експериментальних і чисельних (DEM–CFD) методів дослідження.

Задачі дослідження:

– проаналізувати сучасний стан вирощування та післязбиральної переробки рицини, фізико-механічні властивості її плодів і насіння, а також наявні технології та машини з метою обґрунтування напрямів підвищення ефективності механізації очищення насіння;

– розробити конструктивно-технологічну схему та принципову конструкцію машини для очищення насіння рицини, що забезпечує поєднання операцій розлущування плодів, відокремлення та аеродинамічного очищення насіння з мінімальними втратами і пошкодженнями;

– побудувати та верифікувати чисельні DEM-моделі процесів деформації і руйнування плодів та насіння рицини з використанням середовища Simcenter Star-CCM+ для аналізу мікромеханізмів руйнування і руху частинок у робочій зоні машини;

– розробити математичні моделі процесів розлущування, відокремлення та очищення насіння рицини і на їх основі обґрунтувати раціональні конструктивні та режимні параметри робочих органів машини;

– експериментально визначити основні фізико-механічні та реологічні властивості плодів, насіння і частинок коробочок рицини та використати отримані дані для калібрування і уточнення чисельних моделей;

– провести експериментальні дослідження роботи розробленої машини, встановити залежності продуктивних, якісних та енергетичних показників від основних режимних параметрів, виконати оптимізацію процесу та порівняти результати з даними чисельного моделювання;

– здійснити техніко-економічне оцінювання розробленої машини для очищення насіння рицини та обґрунтувати доцільність її впровадження у виробничу практику порівняно з існуючими технічними рішеннями.

Об'єкт дослідження: технологічний процес очищення насіння рицини сепаратором-очисником.

Предмет дослідження: закономірності впливу параметрів машини для очищення насіння рицини на якість її роботи.

Методи дослідження. Теоретичні методи ґрунтувалися на аналізі та узагальненні науково-технічної літератури, патентно-інформаційному аналізі існуючих технологій і машин для післязбиральної обробки рицини, а також на застосуванні методів теоретичної механіки, механіки суцільних середовищ і реології для побудови математичних моделей процесів розлущування, відокремлення та очищення насіння. Експериментальні методи включали лабораторні випробування для визначення фізико-механічних і реологічних властивостей плодів, насіння та частинок коробочок рицини, а також стендові дослідження роботи розробленого сепаратора-очисника з варіюванням основних конструктивних і режимних параметрів. Чисельні методи дослідження реалізовано із застосуванням методу дискретних елементів (DEM) у поєднанні з CFD-моделюванням повітряного потоку в середовищі Simcenter Star-CCM+, з використанням контактних моделей Герца–Міндліна, обертального тертя та когезії для відтворення процесів деформації, руйнування і руху частинок у робочій зоні машини. Методи математичної статистики та планування експерименту застосовано для обробки результатів досліджень, побудови рівнянь регресії, оцінювання значущості факторів і адекватності моделей. Оптимізацію конструктивно-технологічних параметрів виконано з використанням багатокритеріальних методів, зокрема скалярного ранжування з мінімізацією мультиплікативної цільової функції. Техніко-економічну ефективність запропонованих рішень оцінено за загальноприйнятими методиками економічного аналізу.

Наукова новизна одержаних результатів. *Уперше:*

– розроблено та верифіковано DEM–CFD модель процесів деформації, руйнування та переміщення плодів, насіння і частинок коробочок рицини в робочій зоні сепаратора-очисника з використанням контактних моделей Герца–Міндліна і когезійних взаємодій, що дозволило кількісно описати багатофазний характер руйнування оболонок;

– встановлено аналітичні залежності продуктивності, якості відокремлення і очищення насіння рицини та енергоємності процесу від основних конструктивно-режимних параметрів сепаратора-очисника, що дало змогу визначити їх оптимальні значення.

Набули подальшого розвитку:

– наукові положення щодо врахування реологічних і фізико-механічних властивостей насіння рицини під час проєктування машин для післязбиральної обробки, зокрема в частині їх впливу на процеси розлущування та аеродинамічної сепарації;

– інженерні принципи створення багатофункціональних машин для комплексної післязбиральної переробки насіння рицини, що поєднують механічні та пневматичні методи розділення матеріалу.

Практичне значення одержаних результатів. Розроблено нову конструктивно-технологічну схему машини для відокремлення та очищення насіння рицини, що поєднує операції розлущування плодів і решітно-аеродинамічного очищення з урахуванням реологічних і фізико-механічних властивостей матеріалу. Запропоновані рішення забезпечують підвищення продуктивності, зменшення втрат і пошкодження насіння та зниження енерговитрат. Виробниче впровадження результатів здійснено на підприємстві ТОВ ВО «Восход», якому передано комплект технічної та конструкторської документації на експериментальний зразок машини; підтверджено зацікавленість у виготовленні дослідної партії для виробничих випробувань і підготовки до серійного виробництва. Науково-дослідне впровадження виконано в Інституті олійних культур НААН України, де проведено напівпромислові випробування машини під час очищення насіння рицини сорту Хортицька 3. Встановлено оптимальні конструктивно-режимні параметри, що забезпечують високу ефективність процесу за технологічними та енергетичними критеріями. Практичну перевірку працездатності здійснено в умовах діючого сільськогосподарського підприємства СФГ «Зоря». Результати роботи впроваджено у навчальний процес Дніпровського державного аграрно-економічного університету

при викладанні дисципліни «Сільськогосподарські машини» для здобувачів спеціальності 208 (Н7) «Агроінженерія».

Особистий внесок здобувача. Теоретичні та експериментальні результати досліджень, представлені в роботі, отримані автором особисто. Формулювання завдань, аналіз та інтерпретація отриманих результатів здійснювалися у співпраці з науковим керівником і частково за участю співавторів публікацій. У наукових працях, опублікованих у співавторстві, здобувачеві належить внесок у відповідних розділах дослідження: [2, 6, 7, 9, 10, 11, 12] – сучасний стан проблеми і вибір напрямів досліджень; [1, 5, 15] – теоретичні дослідження; [1, 3, 4, 8, 13, 14] – експериментальні дослідження; [1, 6, 7] – реалізація результатів досліджень.

Апробація результатів дисертації. Основні результати дисертації доповідались та отримали позитивну оцінку на: III Всеукраїнській науково-практичній конференції молодих вчених «Інжиніринг технологій і технічних систем агропромислового комплексу» (15 листопада 2024 р., Дніпро, ДДАЕУ); X Міжнародній науково-практичній конференції «Інноваційні технології в АПК» (3-4 квітня 2025 р., Луцьк, ЛНТУ); Міжнародній науковій інтернет-конференції «Олійні культури: сьогодення та перспективи» (26 березня 2025 р., Запоріжжя, ІОК НААН); I Всеукраїнській науково-практичній конференції «Здобутки та перспективи розвитку харчової галузі» (30 травня 2025 р., Дніпро, ДДАЕУ); II Міжнародній науково–практичній конференції «Сучасні підходи до вирощування та використання малопоширених плодових, декоративних, ароматичних та лікарських рослин для покращення екологічної ситуації в Україні» (29 серпня 2025 р., Одеса: ІКОСГ НААН); XX Міжнародній науково-практичній конференції «Технічний прогрес в АПК» (21–22 травня 2025 р., Харків, ДБТУ); Міжнародній науково-практичній конференції «Інновації в агропромисловому комплексі, машинобудуванні та транспорті» (9–10 квітня 2025 р., Рівне, НУВГП); XXVI Міжнародній науковій конференції «Сучасні проблеми землеробської механіки» (17–18 жовтня 2025 р., Київ, НУБіП); IV Всеукраїнській науково-практичній конференції молодих вчених (21 листопада 2025 р., Дніпро, ДДАЕУ).

Публікації. Основні результати дисертаційного дослідження опубліковано у 16 наукових працях, зокрема: 1 статтю в закордонному журналі, що індексується в наукометричній базі Scopus; 4 статті в наукових фахових виданнях України за спеціальністю 133 «Галузеве машинобудування» (зараховуються як чотири публікації); 1 патент на корисну модель; 9 тез доповідей на наукових конференціях і 1 стаття в науковому фаховому виданні України за іншими спеціальностями.

Структура та обсяг дисертації. Дисертація включає вступ, п'ять розділів, висновки, перелік використаних джерел та додатки. Загальний обсяг роботи становить 229 сторінок, з яких 35 сторінок відведено для 5 додатків. Основний текст дисертації займає 194 сторінки і містить 63 рисунка та 17 таблиць. Список використаних джерел налічує 197 найменувань та розміщується на 22 сторінках.

1 СТАН ПИТАННЯ. МЕТА ТА ЗАВДАННЯ ДОСЛІДЖЕНЬ

1.1 Народногосподарське значення рицини

Рицина (Ricinus communis L.) – теплолюбна технічна культура, що набуває дедалі більшого значення в умовах переходу до сталої біоекономіки. Її багатофункціональність, здатність рости на маргінальних ґрунтах, висока продуктивність насіння та універсальність продуктів переробки дозволяють розглядати рицину як стратегічну сировинну культуру для різних галузей народного господарства – від хімічної промисловості до фармацевтики, біоенергетики, сільського господарства та екологічної інженерії [9, 10].

Насамперед слід відзначити промислове значення рицини завдяки її основному продукту – касторовій олії. За хімічним складом вона містить до 90 % рицинолеїнової кислоти, що надає їй виняткових властивостей: високої в’язкості, полярності, термічної стабільності та мастильної здатності. Це робить касторову олію незамінною у виробництві лубрикантів, фарб, емульгаторів, мастил, косметичних засобів, поліуретанів та біополімерів [33, 34, 35]. Світовий ринок касторової олії продовжує зростати, досягнувши 1,47 млрд $ у 2025 році, переважно за рахунок Індії, яка постачає понад 80 % обсягів [36].

Іншим важливим напрямом є використання рицини для виробництва біопалива. Завдяки високому виходу олії з насіння та відповідності міжнародним стандартам якості (EN 14214 [37], ASTM D6751 [38]), касторова олія є придатною для отримання біодизеля. Особливо цінним є те, що біопаливо з рицини зберігає стабільні характеристики при низьких температурах, що є перевагою для країн із помірним або холодним кліматом [39]. За даними [40], рицина може забезпечувати конверсію на рівні 90–95% у процесі етерифікації, демонструючи високу енергоефективність. Це дозволяє вважати її перспективною альтернативою традиційним енергоресурсам, особливо в умовах енергетичної кризи та декарбонізації економіки.

У сільському господарстві рицина має двояке значення. По-перше, її побічні продукти – зокрема макуха (шрот) після віджимання – багаті на азот, фосфор і калій, що дозволяє використовувати їх як органічні добрива. Дослідження показують, що шрот рицини має також антинематодну дію, зменшуючи чисельність ґрунтових патогенів. По-друге, рослина характеризується здатністю зростати в екстремальних умовах – на солонцях, деградованих ґрунтах, у посушливих регіонах, що робить її ідеальною культурою для маргінальних земель [41].

Крім агрономічного використання, рицину розглядають як ефективну культуру для фіторемедіації. Низка досліджень підтверджує її здатність до акумулювання важких металів, зокрема Pb, Cd, Zn, що дозволяє використовувати її для очищення техногенно забруднених територій [42]. Додатково було показано, що застосування мікоризних грибів та бактеріальних консорціумів посилює фітодеполютантні властивості рицини [43]. Таким чином, вона може бути інтегрована в технології відновлення порушених екосистем.

У фармацевтичній і косметичній промисловості касторова олія також займає провідне місце. Вона використовується як основа для кремів, мазей, шампунів, а також у складі лікарських засобів – зокрема як проносний засіб та як носій для протипухлинних препаратів, завдяки своїм біосумісним властивостям [44, 45]. Новітні дослідження показують потенціал використання касторової олії у створенні біосумісних поліуретанів для хірургічного та ортопедичного застосування [46]. Її антимікробна, протизапальна та ранозагоювальна активність дозволяє розширити застосування в медичній практиці.

Нарешті, рицина має і соціально-економічну вагу. В умовах глобального потепління, деградації ґрунтів та нестачі продовольства рицина здатна підтримувати місцеві економіки у країнах, де традиційне сільське господарство малорентабельне. У Мексиці, наприклад, впровадження рицини як культури сприяє імпортозаміщенню промислових олій, розвитку кооперативів, створенню нових робочих місць і формуванню агропромислових кластерів [47].

Згідно з даними за 2022 рік, серед 31 країни, Індія займала перше місце за обсягами виробництва насіння рицини – 1618760 т, за нею слідували Мозамбік і

Бразилія. На іншому кінці шкали знаходилися Південна Корея з 0,130 т, Іран – з 27,3 т та Філіппіни – з 35,7 т. Загальний обсяг світового виробництва насіння рицини у 2022 році, за даними FAOSTAT, становив 1829522 т, що на 1,78% менше, ніж у попередньому році, і на 22,8 % менше, ніж 10 років тому. Історично найвищий рівень світового виробництва насіння рицини було досягнуто у 2011 році – 2742492 т, а найнижчий – у 1961 році, коли він становив 580 010 т. Середньорічний приріст виробництва з 1961 року становив 1,90 %. У 2022 році Індія забезпечувала 88,5 % світового виробництва насіння рицини. Разом перші три країни (Індія, Мозамбік і Бразилія) забезпечували 93,9 %, а десять провідних країн – 98,2 % світового виробництва [48].

Для умов України вона становить особливий інтерес завдяки високій стійкості до засухи, здатності зростати на малородючих ґрунтах і невибагливості до агротехнічного забезпечення. За даними вітчизняних джерел, на території України встановлено врожайність насіння рицини селекції Інституту олійних культур НААН: 1,6–1,8 т/га (сорт Олеся), 1,7–2,1 т/га (сорт Хортичанка), 1,5–1,7 т/га (сорт Хортицька 3) [49].

Ринок рицини в Україні залишається вузькоспеціалізованим і малорозвиненим, з незначним внутрішнім виробництвом насіння – за даними FAOSTAT, обсяги становили до 1000 т у 1990-х роках, а в останнє десятиліття офіційні показники відсутні або мізерні. Натомість спостерігається зростаючий імпорт: у 2023 році Україна імпортувала близько 273 т насіння рицини (переважно з Індії) на суму понад 624 тис. доларів США, а експорт рицинової олії склав лише 3,5 т. Роздрібні ціни на рицинову олію коливаються в межах 5,3–5,8 $/кг, а насіння — 0,7–1,3 $/кг, що вказує на високий попит при дефіциті внутрішньої пропозиції. Перспективи ринку в Україні пов’язані з розвитком біоенергетики, косметичної та фармацевтичної галузей, а також із потенціалом імпортозаміщення за рахунок вирощування в південних регіонах країни, зважаючи на адаптивність рицини до посушливих умов [50, 51, 52, 53, 54].

Рицинова олія має широкий спектр застосувань у промисловості: виробництво біодизеля, лакофарбових матеріалів, косметичних і фармацевтичних засобів,

полімерів, мастил для двотактних двигунів, а також як компонент у синтезі напівжорсткої поліуретанової піни для теплоізоляції [15, 16, 17, 18]. Така багатофункціональність сприяє зростанню попиту на рицинову олію на світовому ринку, що створює передумови для її економічно доцільного вирощування і переробки в Україні.

Враховуючи зусилля ЄС щодо декарбонізації і заміщення викопних ресурсів відновлюваними, рицина може відігравати ключову роль у зменшенні залежності як Європейського Союзу, так і України від імпорту рослинної сировини для промислових і енергетичних потреб. За умови створення ефективного внутрішнього ланцюга доданої вартості – від виробництва сировини до переробки та реалізації готової продукції – рициновий сегмент аграрного сектору України здатен стати важливим елементом «зеленої» трансформації економіки.

Таким чином, рицина є багатопрофільною культурою з широким спектром застосувань. Її народногосподарське значення полягає в інтеграції до пріоритетних сфер економіки: виробництва біопродуктів, відновлення екосистем, забезпечення енергетичної безпеки та розвитку малого аграрного бізнесу. За умов науково обґрунтованого підходу та державної підтримки ця культура може стати стратегічним ресурсом сталого розвитку.

1.2 Аналіз фізико-механічних властивостей плодів і насіння рицини

Фізико-механічні властивості плодів і насіння рицини є критично важливими для обґрунтування технологічних режимів очищення, обрушування, пресування та сепарації. Знання морфометричних параметрів, сили зламу, пружності та інших механічних характеристик дозволяє ефективно проектувати технічні засоби та оптимізувати процеси переробки насіння цієї перспективної олійної культури [55, 56].

Результати досліджень [57] показали, що насіння рицини має овальну або еліптичну форму зі значною сферичністю (до 99,4 %), що забезпечує добрі сипучі властивості. За цими даними, середні геометричні параметри насіння становлять:

довжина – 13,52 мм, ширина – 13,39 мм, товщина – 13,38 мм, геометричний діаметр – 13,42 мм, а маса однієї насінини – 1,29 г. Справжня щільність насіння становить 1458 кг/м³, сипуча – 538 кг/м³. Інші джерела повідомляють про ширший діапазон значень. Зокрема, згідно з дослідженнями [58] диких форм рицини, проведеними в Тунісі, довжина насіння може коливатися в межах 11–15 мм, ширина – 7–10 мм, товщина – 4,5–7 мм, а маса – від 0,15 до 0,46 г залежно від сорту та умов вирощування.

Висока механічна міцність оболонки насіння зумовлює необхідність прикладення значного зусилля для її руйнування. За результатами [57] випробувань на стискання, модуль Юнга для насіння рицини становить приблизно 0,44 ГПа, максимальна сила руйнування – 198 Н, а енергія, необхідна для руйнування оболонки – 382 Н·мм. Ці значення перевищують аналогічні показники для насіння соняшнику, що вказує на потребу у відповідному підборі конструкцій пресів.

Механічні властивості змінюються залежно від вологості та температури насіння. За результатами досліджень [32], підвищення температури обробки зменшує силу зламу оболонки на 12–18%, що свідчить про доцільність попереднього підігріву насіння перед механічною обробкою.

Результати чисельного моделювання процесів руйнування оболонки засвідчили, що механічне навантаження слід прикладати з урахуванням напрямку найбільшої жорсткості оболонки – це дозволяє уникнути надмірного пошкодження ядра. Дослідження [59] із застосуванням методу скінченних елементів підтвердили ефективність моделювання напружено-деформованого стану оболонки для визначення оптимального режиму руйнування.

Крім того, морфологічні характеристики плодів рицини також мають значення: зазвичай плід складається з трьох відділів, що містять по одному насінню кожен. Оболонка має міцну структуру, яка вимагає попереднього розкриття перед обрушуванням або пресуванням. Діаметр плоду зазвичай становить 2,2–2,8 см, маса – 3,5–5,5 г, залежно від сорту та умов вегетації [60].

Таким чином, фізико-механічні властивості насіння рицини – міцність оболонки, жорсткість, геометричні характеристики, а також реакція на зміну

температури і вологості – мають суттєвий вплив на параметри технологічних операцій первинної обробки. Їх урахування дозволяє досягти мінімальних втрат цінної олії, зменшити пошкодження ядра та знизити енерговитрати виробництва.

Незважаючи на наявність окремих досліджень фізико-механічних властивостей насіння та плодів рицини, нинішній рівень знань залишається недостатнім для повного науково-технічного обґрунтування ефективних процесів очищення, обрушування, пресування й сепарації. Наявні дані свідчать про значну варіативність морфометричних і механічних характеристик залежно від сорту, регіону вирощування, умов вегетації та вологості. Однак систематизовані дослідження, що охоплюють широкий спектр сортотипів рицини й забезпечують узагальнені інженерні параметри для проєктування технологічного обладнання, практично відсутні. Така ситуація вимагає поглиблених експериментальних і чисельних досліджень, спрямованих на створення цілісної бази інженерних даних для оптимізації переробки цієї перспективної олійної культури.

1.3 Огляд технологій збирання і очищення рицини

Збирання врожаю рицини є вкрай сезонним процесом, а ручна праця має низку недоліків – високу трудомісткість, низьку продуктивність, велику частку втрат і несприятливі умови праці. Механізоване збирання рицини залишається ключовим викликом, що потребує нагального вирішення в межах усієї виробничої ланки. На сьогодні рівень розвитку технологій механізованого збирання рицини залишається низьким, що суттєво стримує загальний рівень механізації її вирощування [61, 62, 63].

На сьогодні в світі вирощують багато сортів рицини, як однорічних, так і багаторічних. Однорічні сорти придатні до механізованого збирання. Рослини рицини мають унікальні особливості: коли основна частина рослини досягає стиглості, плоди на верхівках ще можуть бути незрілими або навіть квітувати. Це висуває високі вимоги до характеристик машин для збирання. Крім того, велика кількість соломи з високим вмістом вологи, що потрапляє в систему очищення

комбайна, легко спричиняє її забивання. Тому для якісного проведення збирання необхідно правильно визначати строки збирання та забезпечувати однорідність стиглості насіння рицини. Важливими етапами є дефоліація (облистянення) та дозрівання перед збиранням [64]. Під час збирання спостерігається значна різниця у висоті стебел рицини. Високорослі сорти можуть досягати приблизно п’яти метрів, що унеможливлює їх механізоване збирання. Наразі для механізованого збирання придатні середньо- та низькорослі сорти, висота яких не перевищує двох метрів. Збирання рицини здебільшого поділяється на комбіноване збирання та поетапне (сегментоване) збирання [65].

Комбайн для збирання рицини, або насіннєвий комбайн рицини, – це технічне рішення, яке дозволяє здійснити повний процес збирання насіння рицини: від збирання плодів, транспортування, лущення та очищення – за один прохід. На сьогодні розроблено зразки насіннєвих комбайнів рицини з вальцьово-щітковим механізмом. Процес збирання полягає у зчесуванні коробочок рицини з рослин, їх транспортуванні конвеєром до задньої частини машини, де відбувається лущення й очищення. Очищене насіння потрапляє до збірної ємності, тоді як стебла залишаються на полі, що забезпечує повноцінне збирання насіння без пошкодження рослини.

Сегментоване збирання передбачає виконання операцій зі збирання, транспортування, очищення та лущення плодів рицини за допомогою двох і більше машин. Його поділяють на два основні сценарії: польовий та на місці зберігання (майданчик). Спочатку плоди рицини збирають у полі, потім транспортують до місця складування та підсушування. Після цього, вже на майданчику, проводиться лущення й очищення плодів спеціалізованими машинами, в результаті чого отримують насіння рицини (рис. 1.1).

Залежно від конструкції платформи для збирання плодів рицини, розрізняють два основні типи: ножовий (різальний) та вальцьово-щітковий [66].

Ножовий тип: передбачає зрізування рослин рицини, транспортування їх до молотильного пристрою, далі – до системи очищення, і, зрештою, – до збірної ємності.

Вальцьово-щітковий тип: передбачає зчесування плодів з рослин щітками та їх транспортування до збірної ємності. Стебла при цьому залишаються на полі.



Рисунок 1.1 – Схема поетапного (сегментованого) способу збирання

Зібрані в полі плоди рицини транспортують до місця обробки. Якщо їх ступінь зрілості та вологість відповідають вимогам для лущення, то плоди одразу обробляють за допомогою лущильної машини. Якщо ж ні – проводять підсушування до досягнення необхідного рівня стиглості, після чого виконують лущення [67, 68].

Узагальнена технологія отримання насіння рицини (рис. 1.2) включає кілька послідовних етапів, кожен з яких спрямований на забезпечення максимально дбайливого та ефективного вилучення цієї цінної сировини з плодів без пошкодження ядра. Через унікальні фізико-механічні властивості рицинових плодів і насіння, застосування традиційного обладнання, призначеного для переробки соняшнику, сої, ріпаку або гірчиці, є неефективним і може призвести до значного травмування насіння, втрати олії та погіршення якості продукції.

Зібрана сировина рицини – це, як правило, суцвіття або китиці, що містять тригнізді плоди. Першим кроком є механічне або ручне відокремлення плодів від стрижня суцвіття. Цей етап часто виконується за допомогою вібраційних або обертових машин, які забезпечують механічне струшування китиці або її

розчісування без надмірного тиску на плоди. Основна вимога – уникнути пошкодження зовнішньої оболонки плодів і передчасного руйнування насіння [69, 70].



Рисунок 1.2 – Технологічні операції отримання насіння рицини

Після відділення від китиць плоди надходять на обрушувальні машини, де відбувається руйнування їх твердої оболонки. На цьому етапі важливо застосовувати обладнання з можливістю регулювання зусилля руйнування, з урахуванням підвищеної міцності оболонки плодів рицини [71, 72, 73].

Отримана після обрушування суміш складається з насіння, частково пошкоджених оболонок плодів, частинок мезокарпу та дрібного пилу. Очищення здійснюється в кілька стадій за допомогою повітряно-ситових, вібраційно-решітчастих і пневмосепараційних машин. Основне завдання – виділити ціле, неушкоджене насіння при мінімальних втратах. Особливу увагу приділяють калібруванню та відбору насіння за щільністю, оскільки ці параметри істотно впливають на подальшу ефективність пресування та якість олії. З огляду на високу пружність і крихкість оболонки, у сепараційних машинах має бути забезпечено плавне переміщення частинок, без високих ударних навантажень [74, 75, 76].

Через значну варіацію розмірів і маси плодів рицини залежно від сорту та умов вирощування (від 3,5 до 5,5 г/плід), параметри обладнання повинні бути легко переналаштовуваними. Механічні впливи на всіх етапах повинні бути максимально контрольованими – особливо важливо уникати локальних перевантажень, що викликають руйнування ядра насіння. Технологія повинна гарантувати мінімальну кількість пошкодженого насіння, оскільки навіть незначні тріщини на поверхні спричиняють втрату олії під час зберігання та зниження її якості.

Таким чином, для ефективної реалізації технології вилучення насіння рицини необхідна розробка спеціалізованого обладнання з урахуванням її унікальних фізико-механічних та реологічних властивостей.

1.4 Аналіз конструкцій машин для відокремлення і очищення насіння сільськогосподарських культур

Технологія лущення плодів рицини є важливою складовою механізованого збирання цієї культури. Водночас цьому напрямку досліджень приділяється недостатньо уваги. Існуюче обладнання для лущення має низку недоліків: обмежену універсальність, високий відсоток пошкоджених насінин, значну кількість домішок і низьку ефективність очищення.

Крім того, обладнання для обрушення, шеретування та очищення насіння інших культур [77, 78, 79, 80] непридатне для використання з рициною через високу ймовірність травмування її насіння. Це зумовлено відмінностями у реологічних властивостях насіння рицини порівняно з насінням інших культур [81, 32].

Отже, вивчення сучасного стану лущильного обладнання у світі, аналіз його переваг і недоліків є надзвичайно важливим для подальшого розвитку технологій лущення плодів рицини.

Дослідження машин для лущення та очищення сільськогосподарської продукції має тривалу історію, яка переважно охоплює економічно важливі культури: арахіс, кукурудзу, рицину, волоський горіх, плоди каучукового дерева, кеш’ю, лонган та насіння камелії. Для відділення шкаралупи від насіння після

лущення використовують методи повітряної та водної сепарації, а також просіювання. Вибір відповідного методу очищення залежить від фізико-механічних властивостей плоду й оболонки [82].

Основною продукцією рицини є касторова олія, тому зібрані в полі плоди обов'язково повинні пройти стадії лущення та очищення з метою отримання чистого насіння. Поширені машини для лущення рицини поділяють за типом дії на тертя та ударні.

Проведено патентно-інформаційний аналіз існуючих машин для виконання технологічної операції лущення плодів рицини та відокремлення насіння.

У роботі [83] було вдосконалено конструкцію машини для лущення рицини типу 6BBS-50 (рис. 1.3), у якій процес лущення здійснюється за рахунок обертання робочих органів – скребка та декової пластини. Вібросито та повітродув дозволяють ефективно відокремлювати насіння від коробочок, забезпечуючи оптимальний баланс між чистотою та мінімізацією пошкоджень.

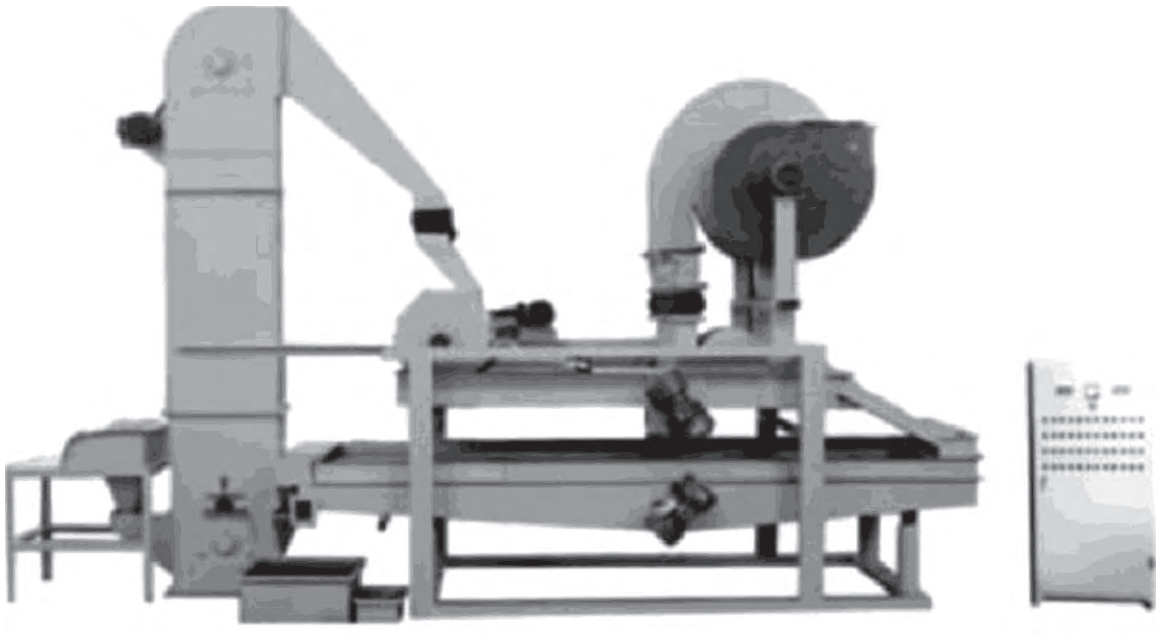


Рисунок 1.3 – Молотарка 6BBS-50 для рицини

У роботах [84, 85] розроблено машину з подвійним конічним лущильним механізмом (рис. 1.4), внутрішня оболонка якого має асиметричну конусну форму.

За допомогою моделювання в середовищі ADAMS дослідники змоделювали процес лущення. За оптимальних параметрів було досягнуто чистоти лущення 92,03% і рівня пошкодження насіння 3,10%.



Рисунок 1.4 – Лущильна машина з подвійним конусом

У дослідженнях [86, 87] було створено динамічну модель лобового зіткнення плоду рицини з робочими органами на основі теорії Герца. Моделювання дало змогу визначити оптимальні умови лущення, які згодом підтвердили експериментально.

У роботі [88, 89] розроблено лущильно-очисний пристрій стискального типу з урахуванням фізико-механічних властивостей плодів рицини та коефіцієнта підвішування. Експериментальними факторами обрали швидкість обертання барабана, а також розміри верхньої й нижньої вивантажувальних щілин; оціночними показниками були ступінь очищення та рівень пошкодження насіння.

У роботі [90, 91] запропоновано гвинтову лущильну установку (рис. 1.5). Проведено механічний аналіз ключових вузлів, побудовано математичну модель деформацій і виконано моделювання для оптимізації частоти обертання, різниці швидкостей і зазору між барабанами.

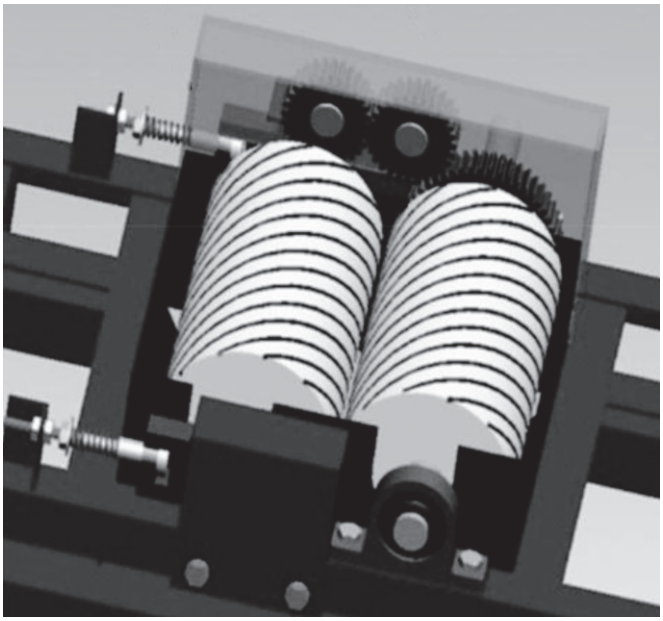


Рисунок 1.5 – Лущильний пристрій з гвинтовими канавками

У роботі [92, 93] створено машину для лущення рицини фрикційно-катального типу (рис. 1.6), виконано 3D-моделювання її конструкції та модальний аналіз, а також досліджено вплив різних факторів на експериментальні результати.



Рисунок 1.6 – Фрикційно-катальна лущильна машина

У статті [94] розроблено повітряну сепараційну систему очищення. Встановлено кінематичні та динамічні рівняння руху плодів рицини в повітряному потоці, змодельовано вплив кута запуску, швидкості повітря та інших параметрів.

Також було сконструйовано лущильну машину та експериментально визначено оптимальні параметри – зазор між деками та швидкість обертання вала – для трьох типів матеріалу барабана (метал, гума, дерево). Проведено статистичний аналіз ефективності лущення, ступеня очищення та рівня пошкодження зерна [95].

У роботі [96] інженери створили машину з повітряною системою очищення (рис. 1.7) та випробували її за різного вмісту вологи в сировині. Найкращих результатів було досягнуто за вологості 6%.



Рисунок 1.7 – Повітряна сепараційна лущильна машина

У статті [97] наведено результати досліджень властивостей плодів бразильської рицини для потреб лущення. Встановлено, що ефективність роботи обладнання залежить від швидкості обертання барабанів у діапазоні 490–710 об/хв, при цьому оптимальна ефективність досягається за швидкості понад 590 об/хв.

У роботі [98] дослідники застосували метод скінченних елементів для вивчення поведінки недостиглого, стиглого та перезрілого насіння рицини під час квазистатичного стискання. Показано, що в'язкоеластичні властивості насіння залежать від вмісту олії.

У дослідженні [99] було використано вдосконалений дисковий млин (рис. 21) після попереднього поділу плодів за діаметром. Виявлено, що такий підхід суттєво підвищує ефективність очищення, яка досягла 85% за оптимальних параметрів.

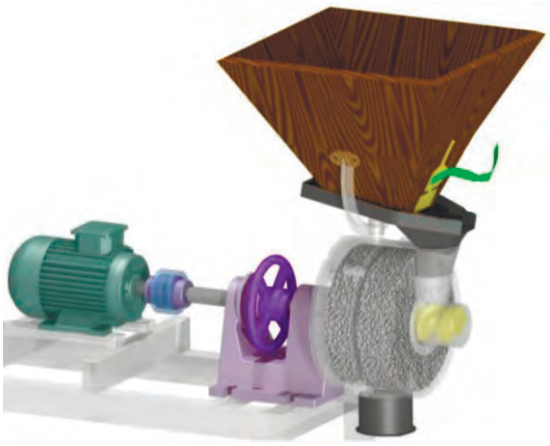
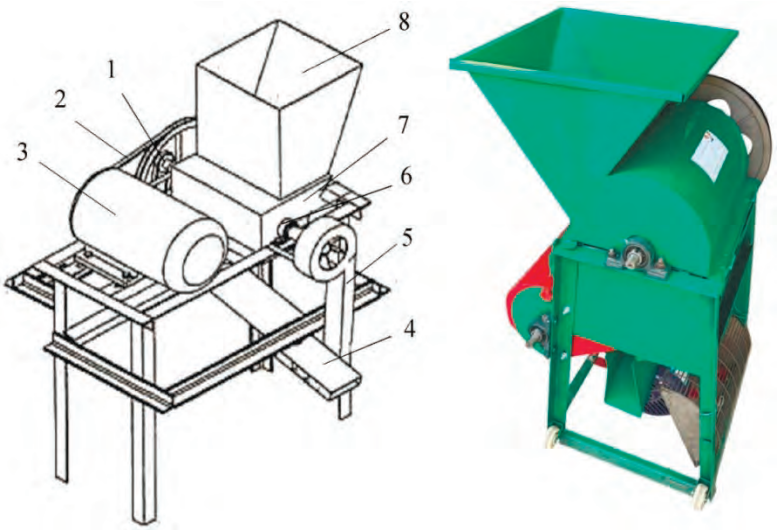


Рисунок 1.8 – Прототип модифікованого млина дискового типу

У [100] розроблено роликову машину з подвійним етапом обробки: подрібненням і лущенням. Кожна пара роликів утворює екструзійний механізм із повітряною системою очищення. За проміжку 10,5 мм і швидкості повітря 10 м/с рівень відокремлення сягав 94,6%; при проміжку 6,0 мм і швидкості 7,5 м/с рівень лущення досягав 97,7% при втраті 2,4%.

В роботі [101] проведено оцінювання продуктивності локально розробленої машини для лущення плодів та відокремлення насіння рицини (рис. 1.9). Розробка машини була здійснена з метою зменшення трудомісткості, пов'язаної з переробкою рицинової олії. Машина складається з двох основних відсіків: блоку відокремлення та блоку лущення. Основним робочим органом блоку лущення є горизонтальний рифлений барабан.



1 – привідний шків; 2 – клиновий ремінь; 3 – електродвигун; 4 – випускний жолоб; 5 – корпус вентилятора; 6 – корпус підшипника; 7 – блок лущення та відокремлення; 8 – завантажувальний бункер

Рисунок 1.9 – Машина для лущення плодів та відокремлення насіння рицини [101]

Недоліками наведеної машини є низька ефективність очищення, яка становить близько 48,7%, що призводить до необхідності додаткового очищення насіння. Ефективність відокремлення та рівень вилучення насіння знижуються при збільшенні швидкості барабана, що обмежує продуктивність машини при роботі з великими обсягами сировини. Вищі швидкості також сприяють зростанню відсотка втрат насіння (0,98% при 400 об/хв проти 0,50% при 240 об/хв) і підвищують ризик механічного пошкодження насіння, що може впливати на його якість. Система повітряного очищення недостатньо ефективна, тому потрібно вдосконалення системи аспірації. Машина працює краще з великим насінням рицини, тоді як дрібне насіння має більший відсоток невидалених коробочок, що потребує додаткових налаштувань. Крім того, через інтенсивне механічне навантаження на барабан, шківи, ремені та інші рухомі частини можливе їх швидке зношування, що вимагатиме регулярного технічного обслуговування. Для підвищення ефективності роботи машини слід вдосконалити систему очищення, покращити налаштування для

різних розмірів насіння та оптимізувати швидкісний режим для досягнення балансу між продуктивністю та якістю обробки.

Роботи [102–103] охоплюють проєктування, виготовлення та оцінку ефективності роботи машини для лущення насіння рицини. Машина була спроєктована з загальною потребою в потужності 2,6 кВт і призначена для лущення вибраних сортів насіння рицини, що робить її придатною для малих і середніх виробників насіння рицини. Конструкція машини включає завантажувальний бункер, лущильний циліндр, решітчасту деку, підшипники, очищувальний блок, шків, вихід для насіння, вал і раму (рис. 1.10).

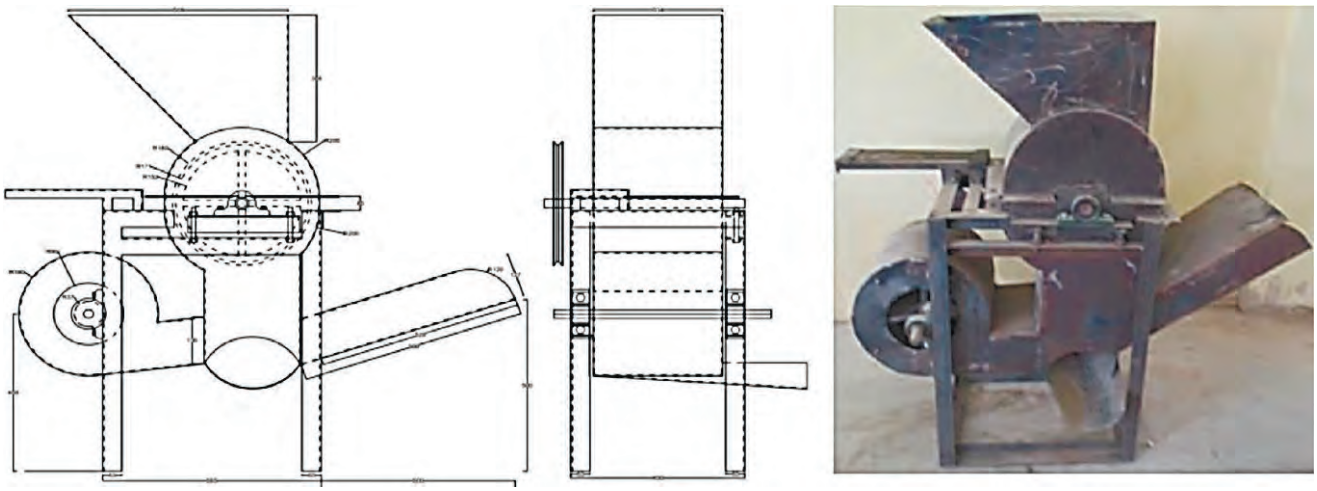


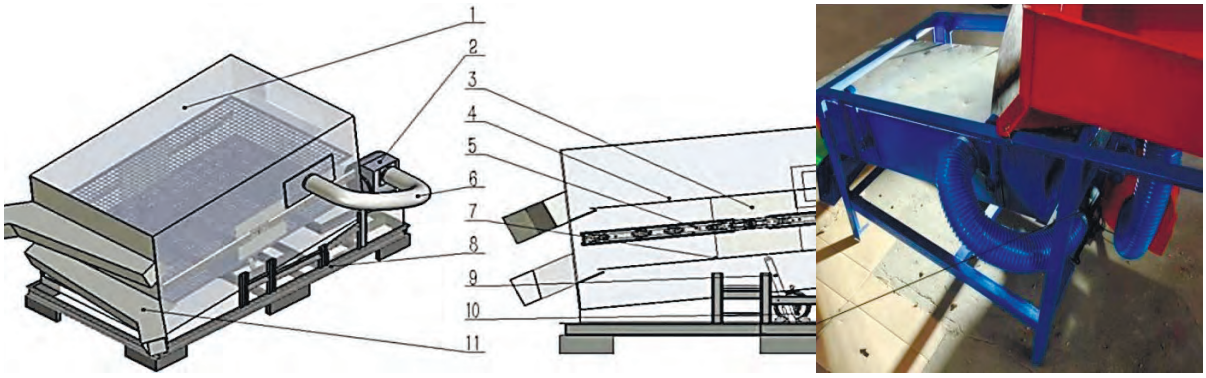
Рисунок 1.10 – Машина для лущення насіння рицини [102-103]

Основними недоліками машини для лущення насіння рицини є її обмежена продуктивність, яка становить лише 12,19 кг/год, що може бути недостатнім для великих фермерських господарств або промислового використання. Високий рівень механічного пошкодження насіння (6,04%) може впливати на його подальше використання, особливо якщо насіння призначене для висадки або переробки в масло. Втрати насіння також є суттєвою проблемою, оскільки 2,89% насіння розсіюється або втрачається під час роботи машини, що знижує загальну ефективність процесу. Хоча машина виготовлена з локально доступних матеріалів, їх довговічність та зносостійкість можуть бути нижчими, ніж у промислових

аналогів. Також вона має обмежену гнучкість у налаштуваннях, оскільки працює найкраще лише при конкретних параметрах (швидкість циліндра 220 об/хв, зазор 15 мм), що може бути неефективним для різних сортів насіння рицини з іншими характеристиками. Крім того, можливий високий рівень енергоспоживання, оскільки потужність машини становить 2,6 кВт, що може бути витратним при тривалому використанні, особливо в регіонах із нестабільним електропостачанням.

В роботі [104] була спроєктована та виготовлена валкова лущильна машина для насіння рицини типу CSSM-1, враховуючи всі активні частини з точки зору міцності та жорсткості. У цій роботі машина була модернізована до версії CSSM-2 для усунення всіх недоліків CSSM-1. Конструкція та характеристики були розроблені з урахуванням використання дрібного насіння рицини. Недоліки CSSM-1 полягали в недостатній ефективності лущення, очищення та сепарації, що вимагало модифікації конструкції. Механізм не був достатньо портативним і важким через більші розміри, а також були проблеми з надійністю і жорсткістю деяких компонентів. Висока маса та габарити обмежували можливості транспортування та експлуатації машини в різних умовах. Крім того, існувала необхідність у покращенні розподілу навантажень на вал і механізми, що могли б спричиняти знос і поломки при інтенсивній роботі.

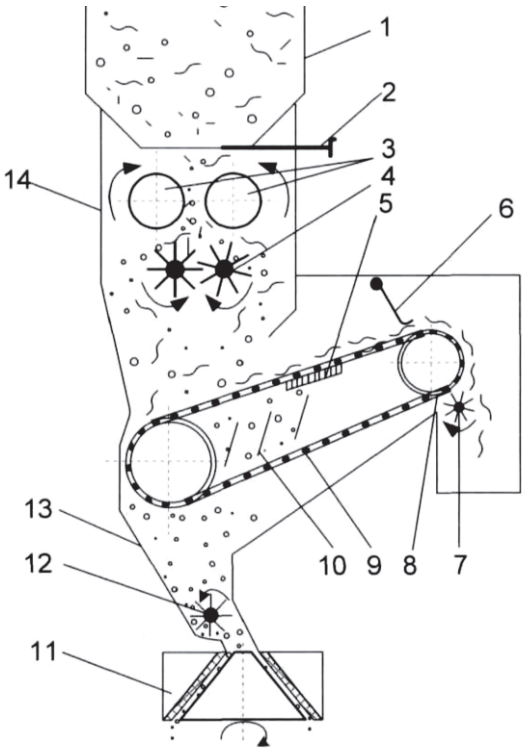
З метою поліпшення очисного ефекту лущильної суміші рицини в роботі [105] був розроблений повітряно-ситоподібний пристрій для очищення рицини (рис. 1.11). Він складається з області для очищення, вібраційного сита, випускного отвору, вентилятора, кривошипно-шатунного механізму, двигуна та рами. Основні недоліки пристрою для очищення насіння рицини включають обмеження у роботі з великими об'ємами матеріалу, складність налаштування оптимальних параметрів для різних умов та можливість забивання матеріалом, незважаючи на вдосконалення конструкції. Крім того, ефективність може змінюватися залежно від розміру отворів сита, що вимагає ретельного калібрування для мінімізації втрат насіння. Різноманітність в налаштуваннях повітряного потоку і вібрації може також впливати на якість очищення при різних умовах експлуатації.



1 – очищувальна кімната; 2– вентилятор; 3 – вертикальні пластини; 4 – верхнє вібруюче сито; 5 – похила площина; 6 – канал; 7 – нижнє вібруюче сито; 8 – каркас; 9 – механізм кривошипно-колінчатий; 10 – двигун; 11 – вихідний отвір

Рисунок 1.11 – Повітряно-ситоподібний пристрій для очищення рицини [105]

Ряд патентів України на корисну модель [106, 107] свідчать про деякий розвиток вітчизняної інженерної ідеї в напрямку розробки машини для попереднього очищення насіння рицини. Машина для попереднього очищення насіння рицини (рис. 1.12) складається з рами, бункера-живильника з регульованою заслінкою, лотка-живильника, барабана-решета, струшувача решета, пристрою для зниження витрат, очищувальної щітки, напрямних і конвеєрно-роторного решета. У лотку-живильнику на підшипникових опорах розташована пара прогумованих валків із можливістю регулювання зазору між ними. Ці валки обертаються в протилежних напрямках і мають різну кутову швидкість. Під ними встановлено пальцеві розпушувачі, що обертаються у зворотному напрямку відносно валків. В патентах зазначений технічний результат, як підвищення ефективності післяжнивної обробки і сепарації насіння рицини. Однак при цьому у виробництво дана розробка не потрапила. Також відсутня інформація щодо експериментальних досліджень процесу роботи цього обладнання.



1 – живильник; 2– регульована заслінка; 3 – прорезинені валки; 4 – пальцеві розрихлювачі; 5 – струшувач решета; 6 – витратознижуючий пристрій для обмеження висоти шару вороху; 7 – очищуюча щітка; 8 – приводний барабан; 9 – конвеєрне решето; 10 – направляючі вороху; 11 – вальце-дековий очищувач; 12 – дозуючий пристрій; 13 – вивантажувальний лоток; 14 – лоток-живильник

Рисунок 1.12 – Машина для попереднього очищення насіння рицини [106–107]

Недоліками такої машини є низька продуктивність і недостатня якість очищення насіння, що зумовлено слабким впливом конвеєрно-роторного решета на ворох під час транспортування. Частки вороху, розмір яких менший за перфорації решета, проходять крізь них, тоді як великі домішки, частини стебел, розплющені коробочки та їх уламки спрямовуються в окремий бункер. Водночас частки, розміри яких наближені до розміру перфорацій, забивають отвори решета, очищаючись лише в його кінцевій частині за допомогою щітки. Це суттєво зменшує робочу площу решета, що негативно впливає на продуктивність та якість очищення рицини. Також недоліком цього пристрою є недостатня ефективність сепарації вороху

рицини внаслідок того, що не розлущені плоди (коробочки) і насінини, по мірі їх переміщення, не відокремлюються від суміші.

Відома конусна дробарка (рис. 1.13) [108] хоча й призначена для подрібнення частинок гірської породи, прийнята як прототип для розлущування плодів рицини та відокремлення її насіння і коробочок. Пристрій складається зі станини, зворотного конусу, завантажувального бункера, дробильного конусу і привода. Зворотний конус включає корпус із внутрішньою футеровкою, чотири регулювальні гвинти, чотири зірочки та ланцюг. Завантажувальний бункер складається з ємності та пруткової решітки. Дробильний конус складається із зовнішньої футеровки, розподільника і конічного валу. Привід включає конусний ексцентриковий стакан-вал, кутовий редуктор, ведений шків, ремінь, ведучий шків і основний електродвигун.



Рисунок 1.13 – Конусна дробарка для подрібнення частинок гірської породи

Недоліком цього пристрою є відсутність системи очищення, що не дозволяє ефективно видаляти легкі домішки, пил і дрібні частинки після подрібнення, що

негативно впливає на якість очищення насіння рицини. Також недоліком є відсутність автоматичного регулювання положення зворотного конусу під час роботи, що знижує точність налаштувань. В пристрої не передбачено блока керування, що унеможливлює централізоване та автоматизоване керування процесом очищення.

Дослідження технології лущення плодів рицини, які проводяться як вітчизняними, так і закордонними вченими, здебільшого зосереджені на вивченні конструкційних форм, кінематичних характеристик, аналізі руху та оптимізації параметрів. Тому необхідно активізувати використання сучасних методів проєктування, оптимізувати ефективність лущення, зменшити пошкодження насіння та сприяти розвитку галузі переробки рицини.

Узагальнюючи проведений аналіз машин для розлущування плоду та відокремлення насіння складено принципові схеми будови робочих зон кожної групи машин (рис. 1.14).

До першої групи належать машини, у яких плід піддається лущенню під дією тертя та зусиль стиснення між торцевими поверхнями двох дисків з абразиву або між нерухомою декою та валком, що обертається. Зазначені машини відрізняються траєкторію руху плодів під час лущення та в часі впливу зусиль на них. Найпоширенішими є лущильні постави з нижнім бігуном, які мають вертикальну вісь, на якій обертається абразивний диск (бігун), тоді як верхній диск, паралельний нижньому, залишається нерухомим. Матеріал подається через отвір диску, який розташований зверху, та переміщується по спіралеподібній кривій і відходить у випускний патрубок за допомогою лопаток, прикріплених до диска. Сили, що діють при цьому способі механічного впливу на плід зводяться до стиснення та тертя кочення з ковзанням. Відносне переміщення плоду в міждисковому просторі постави забезпечується відцентровою силою. До цієї ж групи належать і вальцедекові верстати, в яких плід піддається лущенню між обертовим (піщаниковим) барабаном і нерухомо закріпленою декою, що прилягає до робочого валка з жорсткою або еластичною поверхнею. Плід, потрапляючи у робочу зону, поступово звужену від місця прийому до виходу, піддається дії комплексу зусиль –

стиснення та тертя. При цьому час впливу на кожний плід менший порівняно з часом впливу в лущильних машинах, а траєкторія руху плоду наближена до частини кола.

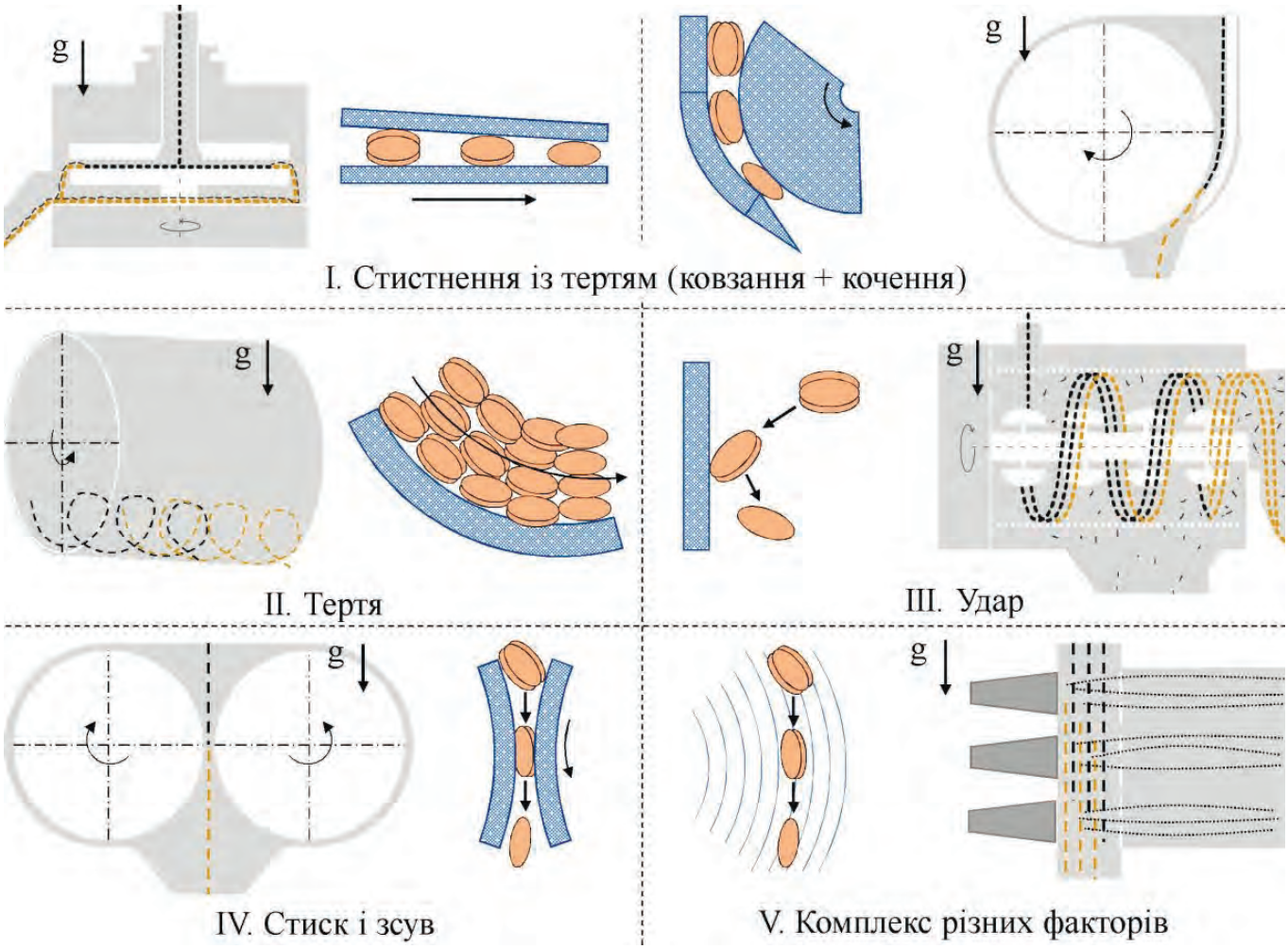


Рисунок 1.14 – Класифікація принципових схем будови робочих зон машин для розлущування плоду та відокремлення насіння

До другої групи належать машини, у яких лущення відбувається за рахунок тривалого впливу сил тертя між плодами, та їх тертя об робочу поверхню дисків з абразиву і обичайку з перфораціями. Унаслідок інтенсивного мікрозношування зовнішніх оболонок відбувається їх відділення. Для цього різновиду лущильно-шліфувальних машин характерним є обов’язкове заповнення робочої зони плодами. Лише за цієї умови створюються передумови для повного прояву сил тертя, що

забезпечує ефективне видалення оболонок. Найпоширенішими є машини з горизонтальним розташуванням осі робочого вала. Плід шліфується на поверхні робочого органу і по досягненню оболонки необхідної товщини відбувається лущення. Траєкторія руху плоду в робочій зоні цієї машини має вигляд гвинтової лінії.

До третьої групи належать машини, у яких плід лущиться під дією багаторазових ударів та інерційних сил. Це досягається за допомогою обертових бичів (лопатей), які відкидають насіння на тверду поверхню, внаслідок чого відбувається руйнування та відділення оболонок. Також плід може прискорюватися обертовим диском і вдарятися об нерухому кільцеву обичайку. До цього типу машин належать обоєчні машини, центробіжні лущильники, бичові машини тощо.

До четвертої групи входять машини, у яких лущення плода відбувається виключно внаслідок дії сил зсуву та стиснення. Використовують пару гумованих валків, що встановлені із зазначеним зазором і таких, що обертаються назустріч один одному із різною швидкістю. До обладнання цього типу належать різні конструкції лущильних машин із гумованими валками.

П’ята група машин відрізняється тим, що лущення плоду відбувається під дією повітряного струменя, який створює комплекс різноманітних факторів, таких як перепади тиску, різниця швидкостей, дотичні сили та стрибки ущільнення. Ці явища виникають при обтіканні продукту високошвидкісним (звуковим або надзвуковим) потоком повітря. До цієї групи належать аеролущильні установки різних типів, які не мають рухомих робочих органів.

Узагальнюючи проведений аналіз машин для очищення насіннєвої суміші складено чотири групи їх принципових схем (рис. 1.15).

Віброрешітні сепаратори працюють на основі механічного розділення компонентів суміші за розмірами. Насіннєва суміш подається на набори сит (решіт), які здійснюють коливальні рухи (вібрацію). Через отвори решіт проходять дрібні домішки (прохід), а великі залишаються зверху (схід). Процес може відбуватися в кілька етапів: перше сито видаляє великі домішки, наступні решета сортують насіння за розміром, у результаті отримують очищене насіння, розділене за

фракціями. Основними перевагами такого сепаратора є висока продуктивність, простота конструкції та експлуатації, ефективне відсіювання механічних домішок.

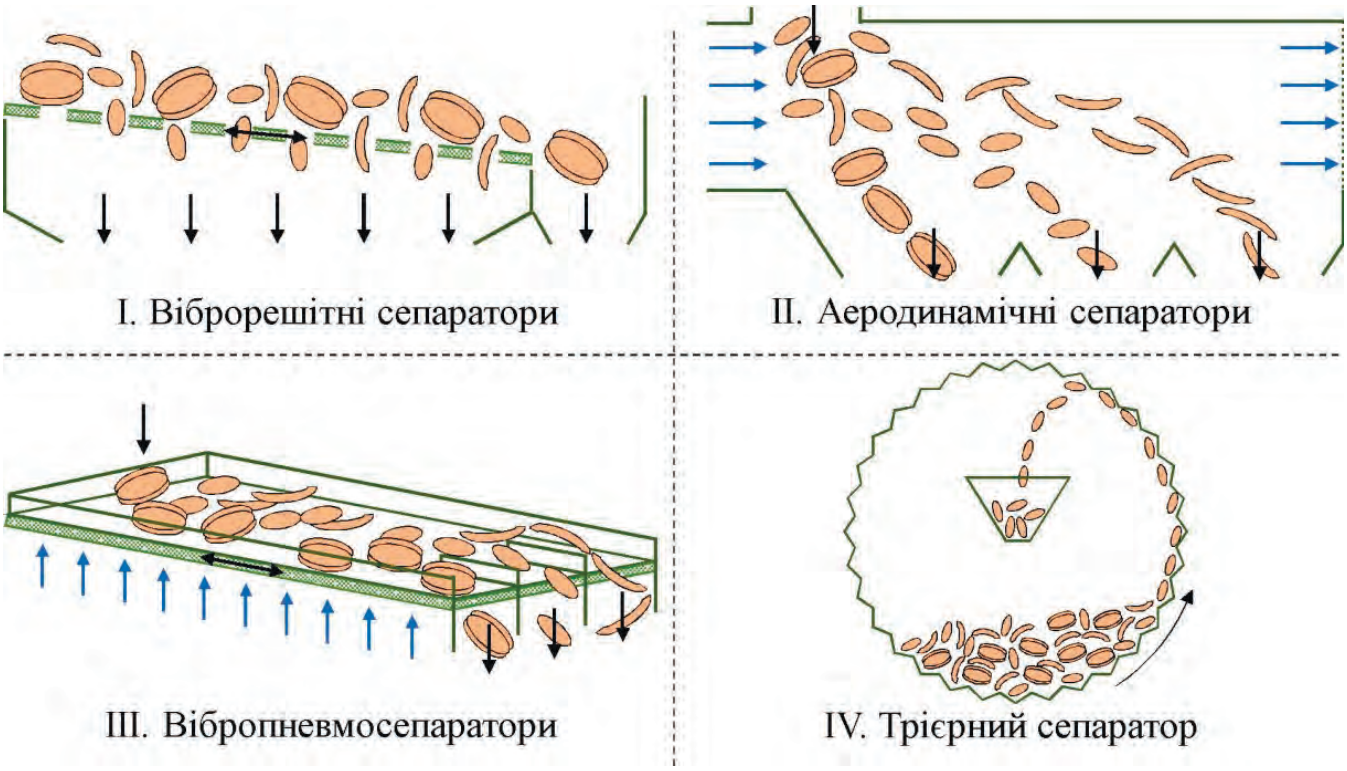


Рисунок 1.15 – Класифікація принципових схем машин для очищення насіннєвої суміші

Аеродинамічні сепаратори використовують потік повітря для розділення компонентів суміші за масою. Насіннєва суміш подається в повітряний канал, де діє спрямований потік повітря: легкі домішки (частинки коробочок, пил) виносяться потоком в окрему камеру, важче насіння падає вниз і збирається в бункері, а деякі моделі мають багатоступеневі канали для точнішого розділення. До основних переваг таких сепараторів належить видалення пилу та дрібних органічних залишків, очищення насіння без механічних пошкоджень і висока ефективність при роботі з дрібним та легким насінням.

Вібропневмосепаратори поєднують механічне (вібраційне) та аеродинамічне очищення. Насіннєва суміш переміщується на вібруючій поверхні у вигляді сітки, через яку надходить потік повітря. При цьому створюється псевдозріджений шар

суміші. Суміш починає розділятися на компоненти за комплексом характеристик (маса, коефіцієнт тертя, аеродинамічні властивості). Основними перевагами таких сепараторів є поєднання двох ефективних методів очищення, висока якість очищення навіть складних сумішей та можливість регулювання інтенсивності вібрації та потоку повітря.

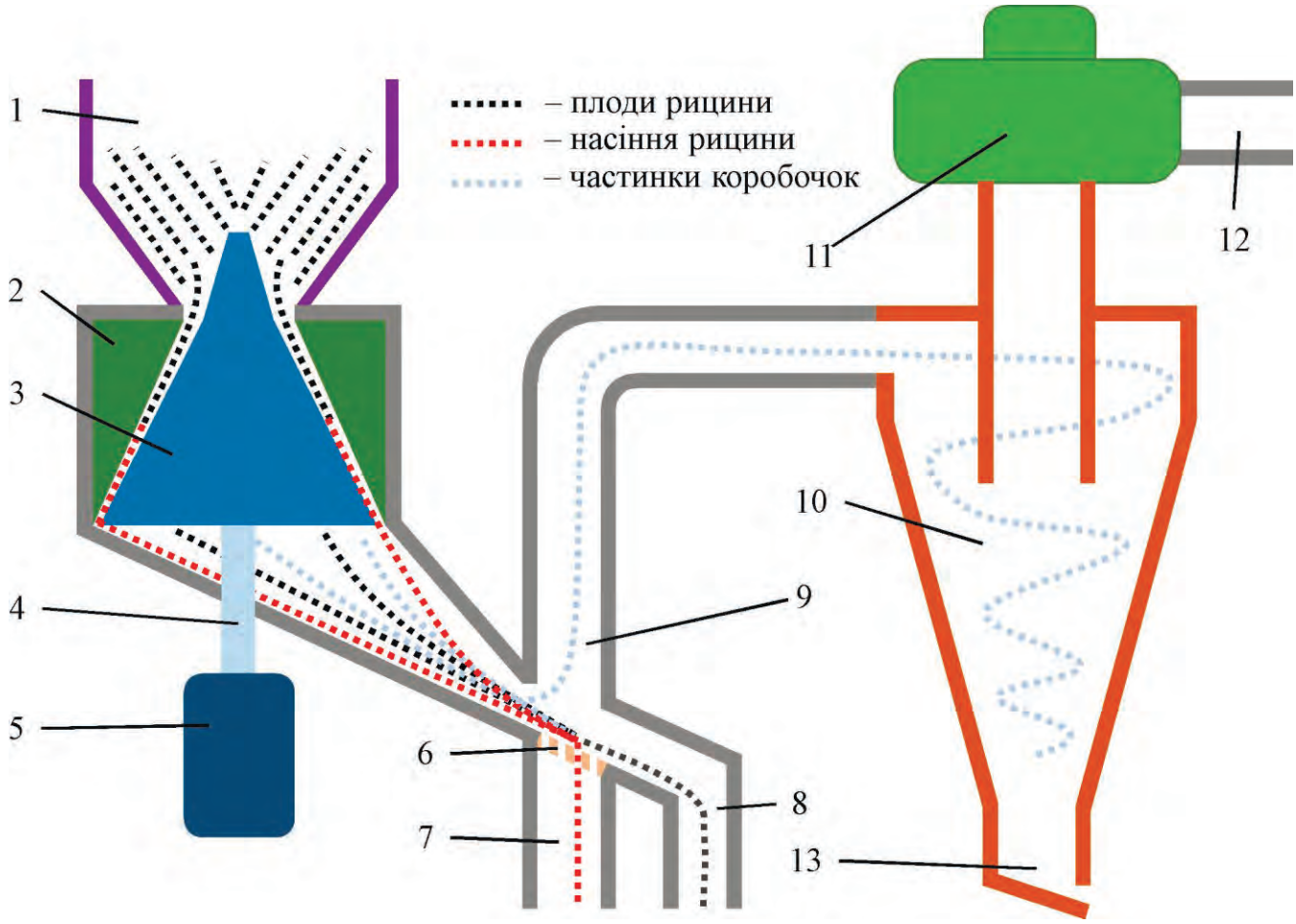
Трієрний сепаратор використовує різницю у формі та довжині насіння для відділення домішок. Насіння подається в обертовий барабан із комірками (трієрами), які захоплюють насіння певного розміру та транспортують його до спеціального жолоба, тоді як довші або коротші частинки залишаються у вихідному потоці та видаляються. Основними перевагами такого методу є висока точність розділення, видалення довгих (недозрілих) та коротких (битих) частинок, а також можливість сортування насіння різних культур.

Враховуючи те, що насіння рицини під час його відокремлення від плоду не повинно травмуватися, найбільш сприятливим способом є лущення плоду внаслідок дії сил стиснення та зсуву. Такої взаємодії можна досягти, використовуючи гумовий валок і нерухому гумову деку.

Під час технологічних операцій розлущування плоду і відокремлення насіння рицини утворюється суміш, яка містить три основні компоненти: нерозлущені або частково розлущені плоди (великі важкі компоненти), насіння рицини (середні компоненти) і частинки коробочок (маленькі легкі компоненти). У цьому випадку найкраще використовувати аеродинамічну сепарацію суміші з елементами решітного сепаратора. З урахуванням цього складено технологічну схему машини для очищення насіння рицини (рис. 1.16).

Розроблена машина працює наступним чином: плоди рицини завантажуються у бункер, далі під дією сили тяжіння потрапляють у зазор між нерухомою гумовою декою і конусоподібним гумовим валком, який розміщено вертикально. Обертання валка забезпечує мотор-редуктор. Плоди рицини, проходячи через зазор, що звужується, розлущуються із відокремленням насіння рицини і частинок коробочок. Сформована насіннєва суміш (нерозлущені або частково розлущені плоди, насіння рицини, частики коробочок) потрапляє до зони, де встановлено решето.

Нерозлущені або частково розлущені плоди сходять з решета і потрапляють у відповідний патрубок. В свою чергу, очищене насіння проходить через решето. Повітряний потік, створюваний відцентровим вентилятором, втягує частинки коробочок у циклонний сепаратор, де відбувається його накопичення та відділення пилоподібних домішок.



1 – завантажувальний бункер; 2– нерухома гумова дека; 3 – конусоподібний гумовий валок; 4 – вал; 5 – мотор-редуктор; 6 – решето; 7 – патрубок для насіння; 8 – патрубок для нерозлущених або частково розлущених плодів; 9 – повітропровід; 10 – циклонний сепаратор; 11 – відцентровий вентилятор; 12 – патрубок для пилу; 13 – патрубок для лушпиння

Рисунок 1.16 – Технологічна схема машини для очищення насіння рицини

Розроблена машина має низку переваг:

– використання гумових елементів забезпечує делікатне лущення, що мінімізує пошкодження насіння і підвищує якість кінцевого продукту;

– поєднання решітного та аеродинамічного сепарування гарантує ефективне очищення насіння від лушпиння та нерозлущених плодів.

1.5 Огляд основних результатів досліджень процесів відокремлення і очищення насіння сільськогосподарських культур

Процеси відокремлення насіння сільськогосподарських культур від плодових оболонок (коробочок, стручків, шкаралупи тощо) є критично важливим етапом у післязбиральній обробці врожаю, що значною мірою визначає якість продукції, рівень втрат та енерговитрати. Залежно від морфологічної будови плода та фізико-механічних властивостей насіння, застосовуються різні методи та засоби механічного, вібраційного, ударного чи фрикційного впливу. У наукових дослідженнях останніх років простежується тенденція до поєднання експериментальних підходів із чисельним моделюванням (насамперед DEM і CFD-DEM) процесів розділення, що дозволяє оптимізувати конструкції машин і параметри технологічного режиму [109, 110, 111, 112].

Щодо експериментальних підходів наведемо ряд результатів досліджень процесів відокремлення і очищення насіння різноманітних сільськогосподарських культур.

У статті [113] досліджено процеси сепарації насіння промислових конопель із використанням сит різних типів та аспіраційної колони. Встановлено, що сита з круглими отворами діаметром 3,5 мм, 3,0 мм та 2,0 мм утримують оболонки на рівні 25,98%, 3,59% та 40,28% відповідно, тоді як подовжені отвори 3,0×20 мм малоефективні (1,76%). Комбіновані сита без аспірації дають значну засміченість ядра (45,74–60,25%). Використання аспіраційної колони за оптимальних параметрів ($\alpha = 53°$, $\beta = 6°$) дозволяє видалити до 32,1% легких фракцій і зменшити вміст оболонок у 1,35–11,2 рази. Оптимальним визнано поєднання круглих сит із

аспірацією, що підвищує чистоту продукту та придатне для модернізації ліній переробки насіння.

У статті [114] досліджено вплив окремих параметрів на процес горизонтальної пневматичної сепарації несортованих лущених соєвих бобів та його ефективність. Оцінку здійснювали за показником ефективності сепарації η. Встановлено, що підвищення вологості суміші суттєво знижує η: зростання вологості на 2,2% (з 10,1% до 12,3%) призводить до його зменшення в середньому на 6,8%. Зі збільшенням швидкості повітряного потоку η зростає, однак зростає й винесення цінної фракції. Найбільше підвищення ефективності (14,9–34,3%) спостерігалось при збільшенні швидкості повітря з 7,8 до 10,5 м/с за вологості 10,1% та 15,7%. На основі отриманих результатів розроблено параметричну модель процесу сепарації подрібнених сумішей біологічного походження, яку можна застосовувати для проектування та проведення операцій розділення на фракції за розміром і очищення різних кормових сумішей, а також визначення параметрів руху їх компонентів у пневмоканалах.

У статті [115] описано пристрій для відсікання непотрібних верхніх і нижніх частин качанів кукурудзи, вирощених на насіння, а також для обмолоту і сепарації насіння заданого розміру. Дослідження показало, що на процес обмолоту впливають швидкість обертання качана після удару, радіус барабана, кутова швидкість барабана, кількість обертів і кутова швидкість качана після удару. Встановлено, що під дією удару обмолочувальної гребінки качан не просувається вперед, а гребінка проходить по ньому, відокремлюючи зерна. Також проведено теоретичний аналіз швидкостей і їх впливу на технологічний процес обмолоту та сепарації насіння.

У статтях [116, 117] досліджено експериментально конструктивні та режимні параметри двобарабанної жниварки для збирання олійного льону методом вичісування рослин із коренем. Встановлено залежність масової частки лушпиння, втрат насіння та споживаної потужності від частот обертання молотка і барабана, положення та ширини повітряної решітки.

У статті [118] досліджено модернізований моторизований обмолотник бобових, що використовує коефіцієнт тертя для відділення зерен від домішок.

Експерименти показали ефективність очищення сої 63,3–90% та обмолоту 87–97% із мінімальним пошкодженням 0,78%, для квасолі – 97,16–97,44% з втратами 2,6%. ANOVA показав, що рівень домішок і подача впливають на очищення, а тип поверхні – на обмолот і пошкодження. Найкращою комбінацією параметрів визнано партію 100 г на килимовій поверхні. Використання коефіцієнта тертя підвищує ефективність обмолотника та сприяє розвитку технологій обробки бобових.

У статті [119] розглянуто соєві боби як нетрадиційну сировину для олійної промисловості Узбекистану, де вирощується 16 тис. т сої з вмістом 24–45% білка, 17–22% жиру та 20–32% вуглеводів. Описано результати експериментів із відокремлення лушпиння сорту «Універсал», виконаних на розробленому пристрої з математичним плануванням. Отримано узагальнене емпіричне рівняння коефіцієнта сепарації, що враховує кут нахилу лопаті, початкову вологість насіння, швидкість обертання барабана, швидкість повітряного потоку та витрату продукту. Це рівняння використовується для визначення оптимальних режимів переробки місцевої сої.

У статті [120] досліджено фракціонування насіння пажитника методом вальцьового помелу та вплив зволоження на вихід фракцій. Зі збільшенням вологості від 12 до 20% вихід грубого лушпиння зріс з 33,75 до 42,46%, а борошна зменшився з 49,52 до 41,62%. За 16% вологості отримано 40,87% лушпиння з 73,4% харчових волокон і 6,96% білка та найнижчим показником жовтизни, що свідчить про чисте відокремлення. Лушпиння містило 25,56% розчинних і 47,84% нерозчинних волокон, борошно — 41,83% білка і 13,22% жиру, тоді як ціле насіння містило 22,5% білка і 51,25% волокон. Метод довів ефективність отримання волокнистих і білкових фракцій пажитника.

У роботі [32] було з’ясовано, що сила руйнування оболонки при пресуванні залежить від температури, швидкості пресування та відстані стискання: при температурі ~150 °C вона знижується до ~52 Н, тоді як при ~20 °C може досягати близько 77 Н (рис. 1.17). Аналіз shear-механізму в screw-екстракторах показав три фази руйнування: пошкодження оболонки, перехідне shear-зрізання ендосперму та

виділення олії; при збільшенні навантаження й шорсткості поверхні зростає вихід олії, але зростає й ризик пошкодження ядра.

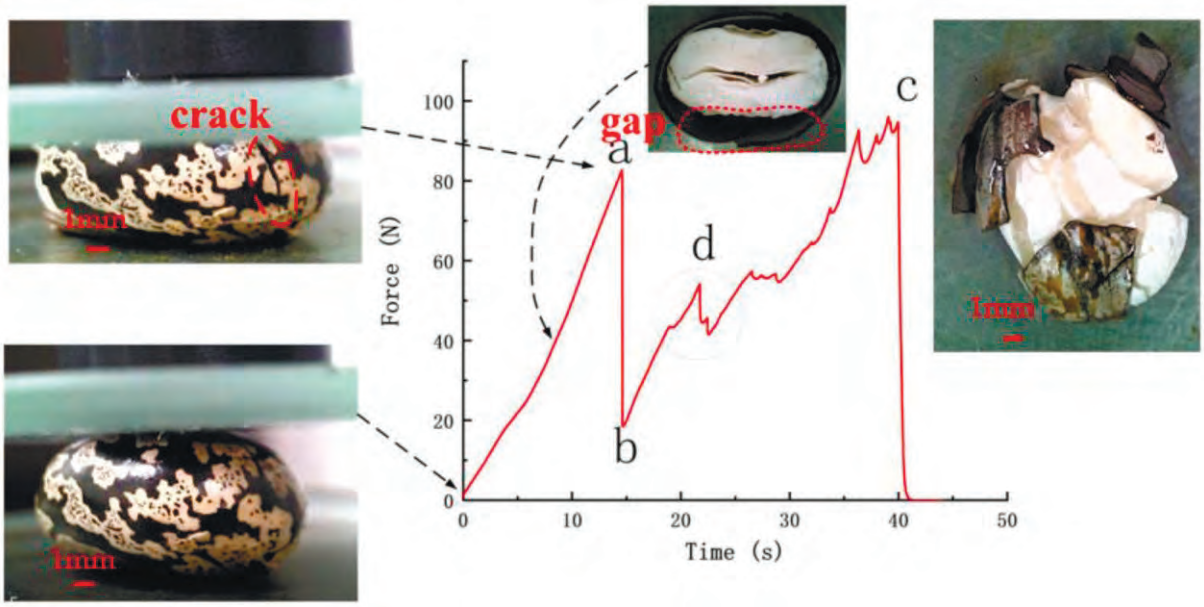


Рисунок 1.17 – Залежність сили F стиску насіння рицини від часу t

Другий основний напрям – чисельне моделювання методом дискретних елементів (DEM). Починаючи з 1990-х років, метод дискретних елементів (DEM) [121] активно застосовується для вивчення процесів руйнування оболонки та внутрішньої структури насіння і зерна, а також для оцінки ефективності обладнання для подрібнення. Суть підходу полягає в описі руху кожної окремої частинки через систему рівнянь, що дозволяє розглядати зіткнення зернин як послідовність парних взаємодій. Простота алгоритму робить DEM універсальним інструментом: його поєднують із моделями зовнішніх сил для імітації транспортних, змішувальних, сепараційних і грануляційних процесів [122, 123, 124, 125, 126, 127]. При аналізі впливу аеродинамічних факторів DEM інтегрують з обчислювальною гідродинамікою (CFD) [128]. У випадках, коли частинки залишають робочу камеру лише після руйнування оболонки (наприклад, у дискових млинах чи роликових дробарках високого тиску), в DEM обов’язково враховується модель деструкції частинок. Для цього використовують два основні підходи: модель зв’язаних

частинок (BPM) [129], де зернина розглядається як система субчастинок, що руйнуються поступово, та модель заміни (PRM), за якою пошкоджена оболонка відразу замінюється групою дрібніших фрагментів. Менш ресурсомістка модель T10, запропонована в роботі [130], набула широкого поширення для опису подрібнення крихких зернових матеріалів [131].

Для проведеного дослідження було використано контактну модель Герца-Міндліна, оскільки вона добре підтримується у більшості DEM-пакетів, має відносно просту реалізацію та підтвердила свою ефективність при відтворенні взаємодії між зернинами в умовах пружного стискання [132, 133]. Такий підхід дає можливість коректно описати криву контактної жорсткості при малих деформаціях, що відповідає характерним умовам зіткнень оболонок зерна під час руйнування.

Окрім цього зазначений підхід реалізовано в роботах [134, 135, 136, 137]. У дослідженнях виконано чисельне моделювання руйнування зерна кукурудзи, пшениці та ячменю при стисканні й ударному різанні із застосуванням методу дискретних елементів (DEM) у середовищі Simcenter STAR-CCM+. Побудовано тривимірні багатосферні моделі зернин та проведено віртуальні експерименти для трьох орієнтацій у просторі: горизонтальної, вертикальної та бокової (рис. 1.18). Повний факторний план дозволив визначити вплив основних фізико-механічних характеристик (модуля Юнга, коефіцієнта Пуассона та граничних напружень) на силу руйнування та забезпечив високу відповідність моделювання даним лабораторних випробувань. Для аналізу процесів ударного подрібнення досліджено значення конструктивних параметрів дискового подрібнювача з накладками (відстань між ними, кут розташування та швидкість руху), що впливають на інтенсивність руйнування оболонки зерна. Запропонований інтегральний критерій ефективності дозволяє визначити оптимальні режими роботи подрібнювача з урахуванням енергозбереження та продуктивності. Встановлені раціональні параметри подрібнення для кукурудзи, пшениці та ячменю можуть бути використані для вдосконалення конструкцій робочих органів та підвищення ефективності зернопереробних процесів.

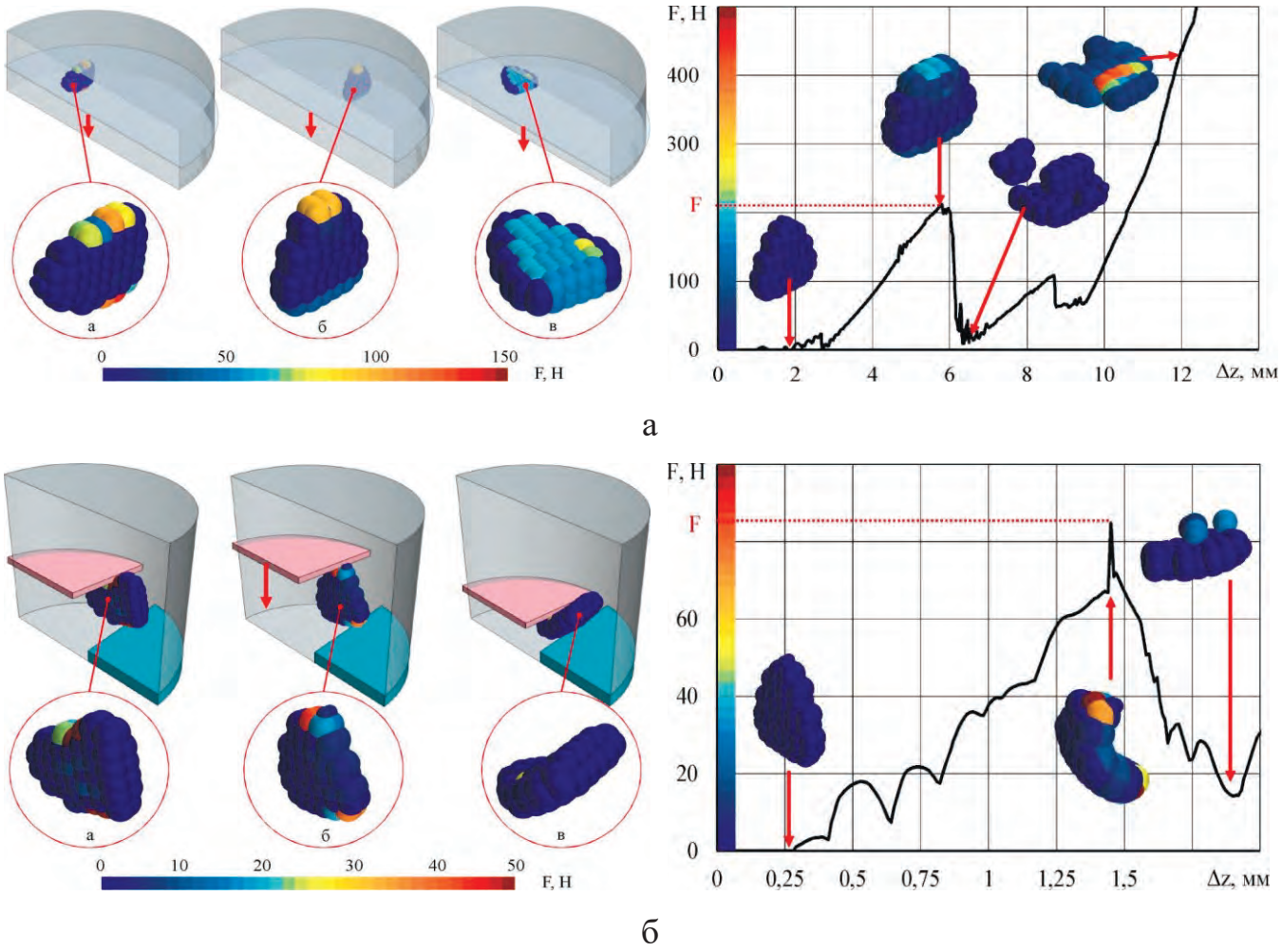


Рисунок 1.18 – Характер зміни сили під час руйнування зернини кукурудзи стиском (а) і ударним різанням (в) при різних орієнтаціях насінини

Враховуючи, що переважна більшість сучасних досліджень, присвячених моделюванню процесів руйнування зернових матеріалів, реалізується на основі DEM-архітектури із застосуванням закону Герца–Міндліна як базового контактного опису, використання саме цієї моделі є доцільним і методологічно виправданим. Такий підхід забезпечує універсальність і сумісність із численними науковими розробками, що дозволяє інтегрувати додаткові алгоритми, орієнтовані на відтворення механізмів деструкції оболонки та внутрішньої структури зернини, без необхідності зміни фундаментальних параметрів контактної взаємодії. Це значно спрощує процес модифікації чисельної моделі, дає змогу швидко адаптувати її під

різні типи культур і умови навантаження та забезпечує коректність при порівнянні результатів із даними інших дослідників.

1.6 Висновки до розділу. Мета та завдання досліджень

1. Рицина (Ricinus communis L.) – перспективна теплолюбна культура з високим біоекономічним потенціалом. Її головний продукт – рицинова олія – є цінною сировиною для хімічної, фармацевтичної, косметичної та енергетичної галузей. Культура здатна рости на маргінальних ґрунтах, має агрономічну й екологічну цінність, зокрема завдяки використанню побічних продуктів як добрив і засобів фіторемедіації. В Україні рицина може слугувати інструментом імпортозаміщення та розвитку сталого сільського господарства, особливо в посушливих регіонах. За наявності інституційної підтримки й переробної інфраструктури вона здатна стати важливою складовою «зеленої» економіки.

2. Фізико-механічні властивості плодів і насіння рицини, зокрема їх морфометричні параметри, міцність оболонки та залежність від вологості й температури, є ключовими для обґрунтування та оптимізації технологічних процесів очищення, обрушування, пресування і сепарації. Висока міцність оболонки і варіабельність характеристик у різних сортів і умовах вирощування вимагають ретельного врахування цих властивостей при проєктуванні обладнання й режимів обробки. Попередній підігрів насіння зменшує силу руйнування оболонки, що підвищує ефективність технологічних операцій. Наразі існуючі дослідження недостатні для повного науково-технічного забезпечення процесів переробки рицини, тому потрібні систематизовані експериментальні та чисельні дослідження для створення комплексної бази інженерних даних і подальшої оптимізації технологій.

3. Збирання врожаю рицини є сезонним і потребує механізації через низьку продуктивність і високі втрати при ручній праці. Особливості рослини – неоднорідна стиглість плодів, висота стебел та велика кількість вологої соломи – ставлять високі вимоги до конструкції машин. На сьогодні рівень механізації

збирання рицини залишається низьким, що гальмує розвиток культури. Існують два основні способи збирання – комбінований за допомогою спеціальних насіннєвих комбайнів із вальцьово-щітковим механізмом та поетапне (сегментоване) збирання із наступним лущенням і очищенням плодів. Технологічні операції включають обережне відокремлення плодів від китиць, регульоване обрушування міцної оболонки плодів, а також багатоступеневе очищення насіння із забезпеченням мінімальних втрат та пошкоджень. Через варіативність морфологічних і фізико-механічних властивостей плодів і насіння необхідне спеціалізоване регульоване обладнання, що враховує унікальні особливості рицини та забезпечує ефективність і якість переробки.

4. В результаті патентно-інформаційного аналізу існуючих машин для виконання технологічної операції розлущування плоду і відокремлення насіння рицини встановлено їх недоліки: травмування очищеного насіння, обмеження у роботі з великими об'ємами матеріалу; складність налаштування оптимальних параметрів для різних умов та можливість забиття матеріалом. Проведено класифікації принципових схем будови робочих зон машин для розлущування плоду та відокремлення насіння рицини та машин для очищення насіннєвої суміші.

5. Встановлено, що під час технологічних операцій розлущування плоду і відокремлення насіння рицини утворюється суміш, яка містить три основні компоненти: нерозлущені або частково розлущені плоди (великі важкі компоненти), насіння рицини (середні компоненти) і частинки коробочок (маленькі легкі компоненти). У цьому випадку найкраще використовувати аеродинамічну сепарацію суміші із елементами решітного сепаратора. З урахуванням цього складено технологічну схему машини для очищення насіння рицини, основними робочими органами якої є нерухома гумова дека, рухомий вертикальний конусоподібний гумовий валок, решето і циклонний сепаратор. Надалі передбачено розробку конструкції машини для очищення насіння рицини на базі розробленої технологічної схеми, обґрунтування її конструктивно-технологічних параметрів, виготовлення і впровадження у виробництво.

6. Аналіз наукових досліджень показує, що ефективність відокремлення та очищення насіння визначається морфологічними особливостями культур і способом механічного чи пневматичного впливу. Найкращі результати забезпечують комбіновані технології (сита з аспірацією, фрикційні та ударно-стискаючі пристрої), які знижують втрати та покращують якість очищення. Поряд з експериментальними методами все ширше застосовується дискретно-елементне моделювання (DEM) у поєднанні з CFD, що дає змогу детально відтворювати взаємодію зернин і конструкцій машин. Використання контактної моделі Герца-Міндліна та підходів BPM/PRM довело ефективність у прогнозуванні процесів руйнування оболонок. Поєднання експериментальних і чисельних підходів визнано найбільш перспективним напрямом, оскільки воно забезпечує підвищення якості продукції та енергоефективності. Це створює основу для подальшого вдосконалення технологій післязбиральної обробки насіння рицини.

Мета дослідження: підвищення ефективності відокремлення і очищення насіння рицини шляхом обґрунтування технологічного процесу, параметрів і режимів роботи сепаратора-очисника на основі їх реологічних особливостей

Задачі дослідження:

– проаналізувати сучасний стан вирощування та післязбиральної переробки рицини, фізико-механічні властивості її плодів і насіння, а також наявні технології та машини з метою обґрунтування напрямів підвищення ефективності механізації очищення насіння;

– розробити конструктивно-технологічну схему та принципову конструкцію машини для очищення насіння рицини, що забезпечує поєднання операцій розлущування плодів, відокремлення та аеродинамічного очищення насіння з мінімальними втратами і пошкодженнями;

– побудувати та верифікувати чисельні DEM-моделі процесів деформації і руйнування плодів та насіння рицини з використанням середовища Simcenter Star-CCM+ для аналізу мікромеханізмів руйнування і руху частинок у робочій зоні машини;

– розробити математичні моделі процесів розлущування, відокремлення та очищення насіння рицини і на їх основі обґрунтувати раціональні конструктивні та режимні параметри робочих органів машини;

– експериментально визначити основні фізико-механічні та реологічні властивості плодів, насіння і частинок коробочок рицини та використати отримані дані для калібрування і уточнення чисельних моделей;

– провести експериментальні дослідження роботи розробленої машини, встановити залежності продуктивних, якісних та енергетичних показників від основних режимних параметрів, виконати оптимізацію процесу та порівняти результати з даними чисельного моделювання;

– здійснити техніко-економічне оцінювання розробленої машини для очищення насіння рицини та обґрунтувати доцільність її впровадження у виробничу практику порівняно з існуючими технічними рішеннями.

Основні наукові результати розділу опубліковано в працях автора [138, 139, 140, 141, 142].

2 ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ВІДОКРЕМЛЕННЯ І ОЧИЩЕННЯ НАСІННЯ РИЦИНИ

2.1 Постановка задачі

Мета теоретичних досліджень – формування наукових основ проєктування та удосконалення технологічного процесу відокремлення і очищення насіння рицини шляхом чисельного моделювання механічної взаємодії плодів і насіння з робочими органами машини, з урахуванням фізико-механічних властивостей сировини та режимів обробки для забезпечення максимальної ефективності процесу при мінімальних пошкодженнях ліквідного насіння.

Постановка задачі теоретичних досліджень:

– обґрунтувати конструктивно-технологічну схему машини для очищення насіння рицини, визначивши раціональну структуру робочих органів та послідовність технологічних операцій з урахуванням морфологічних і біомеханічних властивостей плодів і насіння;

– розробити фізико-математичний апарат чисельного моделювання процесу відокремлення і очищення насіння рицини, що описує контактні взаємодії між частинками сировини, робочими органами та повітряними потоками;

– побудувати чисельну модель руйнування плодів і насіння рицини під дією стиску для визначення критичних напружень, межі пружного та пластичного деформування оболонки плодів;

– провести теоретичні дослідження процесу стиску плодів рицини робочими органами машини з аналізом розподілу тиску, визначенням зони руйнування оболонок та умов збереження цілісності ліквідного насіння;

– виконати чисельне моделювання процесу відокремлення і очищення насінин рицини після руйнування плодів, дослідити динаміку руху частинок, оптимізувати конструктивно-технологічні параметри машини для очищення насіння рицини.

2.2 Обґрунтування конструктивно-технологічної схеми машини для очищення насіння рицини

Машина для очищення насіння рицини (рис. 2.1) складається зі станини 1, зворотного конусу 2, завантажувального бункера 3, дробильного конусу 4, привода 5, системи аеродинамічного очищення 6, блока керування 7.

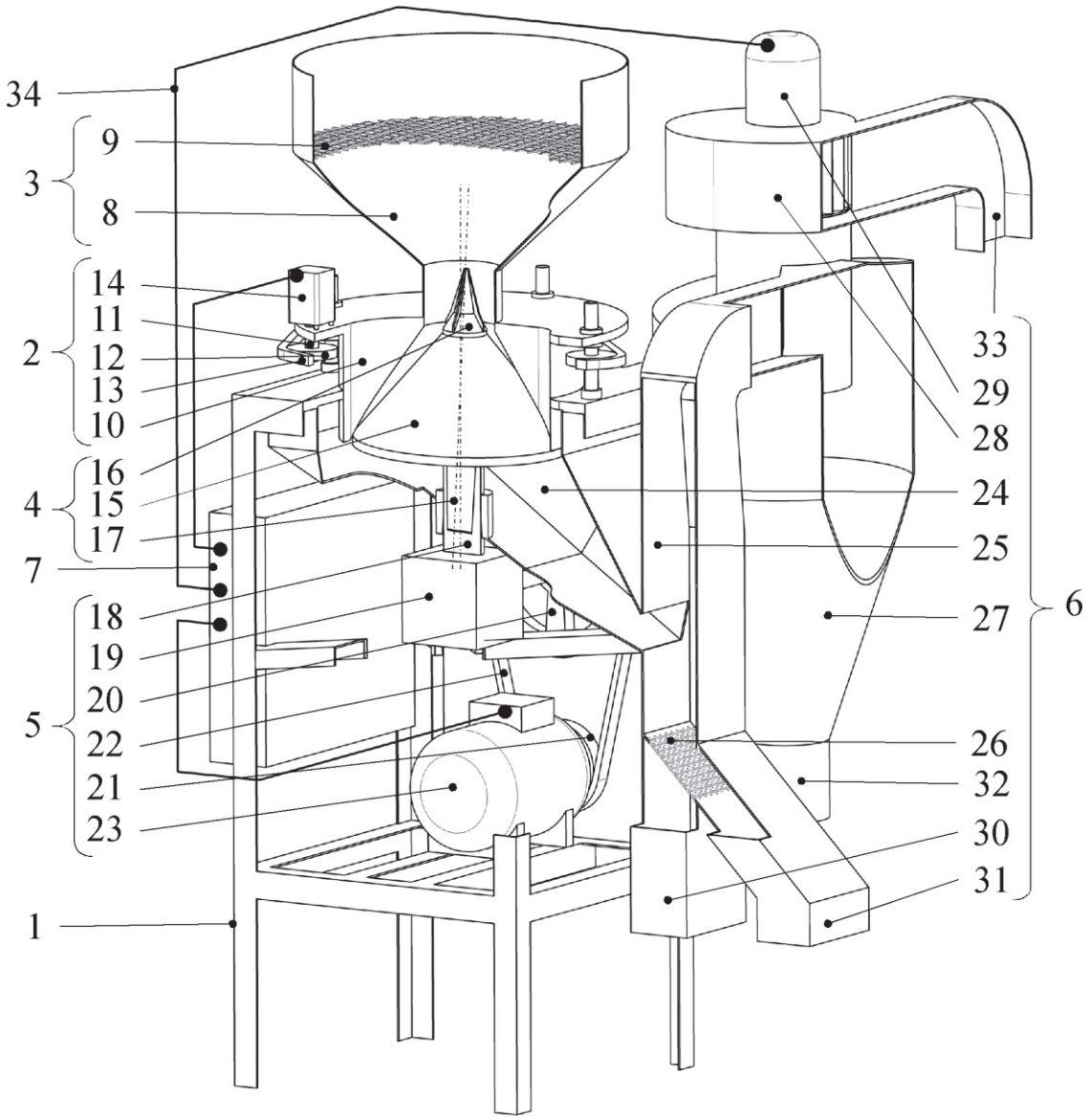
Завантажувальний бункер 3 розміщений в верхній частині станини 1 і складається з ємності 8, в якій встановлена пруткова решітка 9.

Зворотній конус 2 розміщений під завантажувальним бункером 3 на станині 1 і складається з корпусу із внутрішньою футеровкою 10, чотирьох регулювальних гвинтів 11, на яких закріплені зірочки 12. В якості футеровки корпусу із внутрішньою футеровкою 10 використовується гума. Регулювальні гвинти 11 вкручені по краю корпусу із внутрішньою футеровкою 10. Всі зірочки 12 з'єднані між собою у передачу з використанням ланцюга 13. Нижній торець регулювальних гвинтів 11 опирається на станину 1. До верхнього торця одного з чотирьох регулювальних гвинтів 11 закріплено вал мотор-редуктора 14, який встановлений на корпусу із внутрішньою футеровкою 10.

Дробильний конус 4 встановлений в середині корпусу із внутрішньою футеровкою 10 зворотного конусу 2 під певним кутом до осі симетрії для забезпечення коливань при обертанні. Дробильний конус 4 складається з зовнішньої футеровки 15, розподільника 16, який закріплений зверху, і конічного валу 17, який закріплений знизу. В якості зовнішньої футеровки 15 використовується гума.

Привід 5 містить конусний ексцентриковий стакан-вал 18, який приєднано до веденого валу кутового редуктора 19. На ведучому валу кутового редуктора 19 встановлений ведений шків 20. Через ремінь 22 ведений шків 20 утворює передачу з ведучим шківом 21, який встановлений на валу основного електродвигуна 23. Основний електродвигун 23 закріплений на станинні 1.

Система аеродинамічного очищення 6 містить жолоб 24, який розміщений під дробильним конусом 4. Жолоб 24 приєднаний до пневмосепаруючого каналу 25, в нижній частині якого розміщено під кутом до горизонту решето 26.



1 – станина; 2 – зворотній конус; 3 – завантажувальний бункер; 4 – дробильний конус; 5 – привід; 6 – система аеродинамічного очищення; 7 – блок керування; 8 – ємність; 9 – пруткова решітка; 10 – корпус із внутрішньою футеровою; 11 – регулювальний гвинт; 12 – зірочка; 13 – ланцюг; 14 – мотор-редуктор; 15 – зовнішня футеровка; 16 – розподільник; 17 – конічний вал; 18 – конусний ексцентриковий стакан-вал; 19 – кутовий редуктор; 20 – ведений шків; 21 – ведучий шків; 22 – ремінь; 23 – основний електродвигун; 24 – жолоб; 25 – пневмосепаруючий канал; 26 – решето; 27 – циклон; 28 – відцентровий вентилятор; 29 – електродвигун вентилятора; 30 – забірник насіння; 31 – забірник нерозлущених плодів; 32 – забірник частинок коробочок; 33 – забірник дрібних частинок і пилу; 34 – електричні проводи

Рисунок 2.1 – Загальний вигляд машини для очищення насіння рицини

Прохід решета 26 з’єднаний із забірником насіння 30, а його схід – із забірником нерозлущених плодів 31. Верхня частина пневмосепаруючого каналу 25 приєднана до циклона 27, в якому встановлений відцентровий вентилятор 28, що приводиться в дію електродвигуном вентилятора 29. Циклон 27 приєднаний до забірника частинок коробочок 32 і забірника дрібних частинок і пилу 33.

Мотор-редуктор 14, основний електродвигун 23 і електродвигун вентилятора 29 з використанням електричних проводів 34 приєднані до блока керування 7.

Машина для очищення насіння рицини працює наступним чином: перед початком роботи оператор вмикає блок керування 7 і встановлює режими роботи: частота обертання дробильного конусу 4, продуктивність відцентрового вентилятора 28, найменша відстань між поверхнею корпусу із внутрішньою футеровкою 10 і зовнішньої футеровкою 15 дробильного конусу 4. Далі блок керування 7 з використанням електричних проводів 34 передає сигнал до мотор-редуктора 14, основного електродвигуна 23 і електродвигуна вентилятора 29.

Мотор-редуктора 14 приводить в обертання один регулювальний гвинт 11 і зірочку 12, яка за допомогою ланцюга 13 обертає інші зірочки 12 і відповідні регулювальні гвинти 11. При обертанні регулювальних гвинтів 11 за (проти) годинниковою стрілкою, упираючись нижнім торцем об станинну 1 зворотній конус 2 і завантажувальний бункер 3 переміщується вгору (вниз), тим самим зменшуючи (збільшуючи) відстань між поверхнею корпусу із внутрішньою футеровкою 10 і зовнішньої футеровкою 15 дробильного конусу 4.

Основний електродвигун 23 приводить в дію дробильний конус 4 через ведучий шків 21, ремінь 22, ведений шків 20, кутовий редуктор 19, конусний ексцентриковий стакан-вал 18 і конічний вал 17. При цьому дробильний конус 4 виконує обертальний рух із одночасною прецесією його вісі симетрії.

Електродвигун вентилятора 29 приводить в дію відцентровий вентилятор 28, який створює потік повітря в циклоні 27.

Зібрана суміш плодів рицини подається до завантажувального бункера 3. Плоди рицини проходять вільно через пруткову решітку 9, а більш великі рослинні

домішки залишаються зверху неї. Далі плоди рицини потраплять у порожнину, яка утворена між корпусом із внутрішньою футеровкою 10 зворотного конусу 2 і зовнішньою футеровкою 15 дробильного конусу 4. Під час прецесії і обертання дробильного конусу 4 на плоди рицини діють нормальна і дотична сили, що призводить до їх стиснення і подальшого руйнування з відокремленням насіння і частинок коробочок.

Сформована суміш (частково незруйновані плоди, насіння, частинки коробочок і дрібні частинки з пилом) потрапляють у жолоб 24 системи аеродинамічного очищення 6 і далі під дією сили тяжіння переміщуються до пневмосепаруючого каналу 25. Під дією повітряного потоку частинки коробочок і дрібні частинки з пилом відділяються від суміші і рухаються вгору до циклона 27, де відбувається їх розділення і накопичення у забірнику частинок коробочок 32 і забірнику дрібних частинок і пилу 33 відповідно. В свою чергу частково незруйновані плоди і насіння під дією сили тяжіння потрапляють на решето 26. Розмір отворів решета 26 підбирається таким чином, щоб насіння вільно проходило через нього (прохід), а незруйновані плоди залишалися на поверхні (схід). Тому насіння після проходу через решето 26 потрапляють у забірник насіння 30, а незруйновані плоди після сходу з решета 26 у забірник нерозлущених плодів 31.

Розроблена конструкція машини для очищення насіння рицини захищена патентом України на корисну модель № 161299 (додаток А) і має низку переваг, що забезпечують її ефективне функціонування. Насамперед, вона виконує комплексне очищення, поєднуючи механічне руйнування плодів із подальшим аеродинамічним розділенням компонентів суміші. Завдяки наявності блока керування оператор може точно налаштовувати основні параметри процесу, зокрема частоту обертання дробильного конусу, продуктивність вентилятора та відстань між поверхнею корпусу з внутрішньою футеровкою та зовнішньою футеровкою дробильного конусу. Це дозволяє адаптувати машину до обробки різної сировини та досягати стабільної якості очищення. Використання гумових футеровок у конструкції убезпечує травмування насіння. Ексцентриковий механізм приводу дробильного конусу забезпечує інтенсивну дію на плоди рицини, що сприяє їх ефективному руйнуванню навіть при підвищеній

продуктивності. Конструкція пневмосепаруючого каналу та циклона забезпечує чітке розділення насіння, незруйнованих плодів, частинок коробочок і пилу, що зменшує втрати цінного продукту. Добір оптимального розміру отворів решета дає змогу забезпечити вільний прохід насіння при одночасному затриманні нерозлущених плодів. Автоматизована система керування зменшує трудомісткість процесу, а зручна компоновка вузлів машини спрощує технічне обслуговування і очищення після завершення роботи. Сукупність цих технічних рішень забезпечує надійність, високу продуктивність і ефективність очищення насіння рицини.

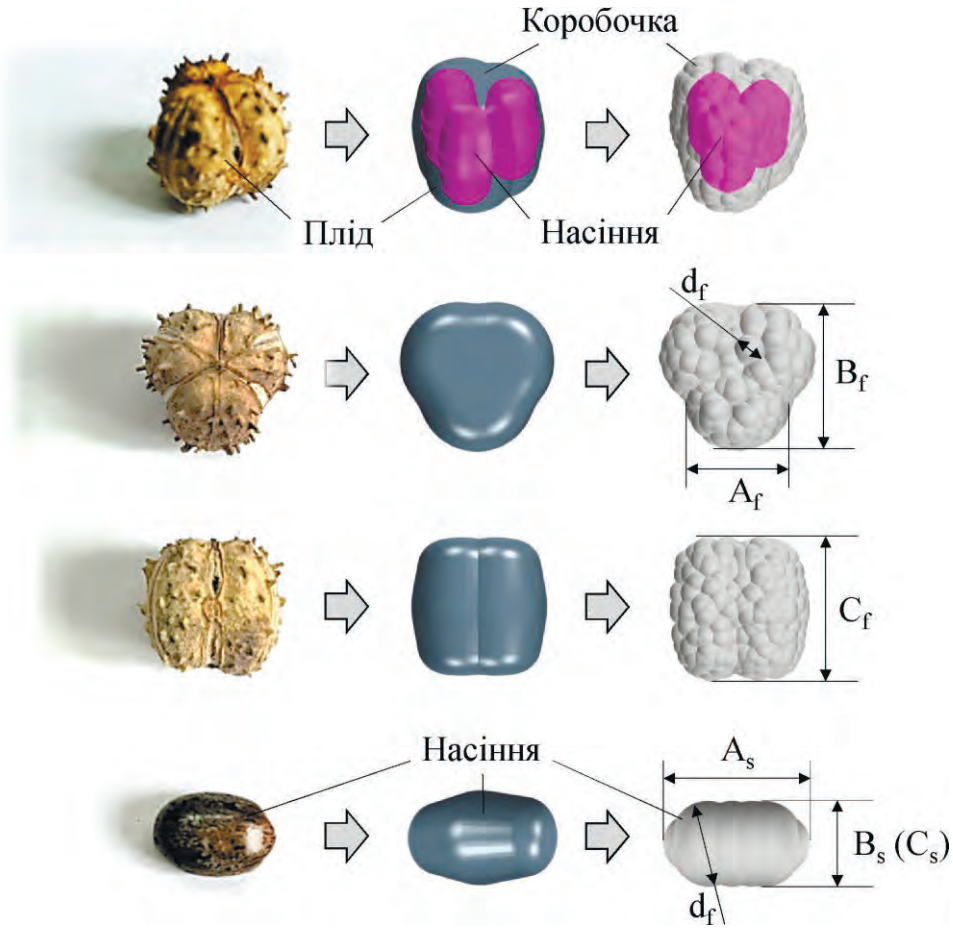
2.3 Фізико-математичний апарат чисельного моделювання процесу відокремлення і очищення насіння рицини

Таким чином, на основі проведеного аналізу (розділ 1) та обґрунтування конструктивно-технологічної схеми машини для очищення насіння рицини (розділ 2.2) було визначено основні функціональні вузли, принцип дії та ключові параметри, що впливають на ефективність її роботи. Однак для глибшого розуміння механізмів відокремлення та очищення насінин, а також для оптимізації конструкції й режимів роботи машини, доцільно залучити інструменти математичного моделювання на основі методу дискретних елементів (DEM) у програмі Simcenter Star-CCM+. Розглянемо далі фізико-математичний апарат чисельного моделювання процесу відокремлення і очищення насіння рицини, який дає змогу відтворити основні закономірності руху частинок у робочій камері машини, оцінити вплив технологічних параметрів на результат процесу та сприяти підвищенню ефективності конструктивних рішень.

У рамках методу дискретних елементів (DEM), вперше описаного в [121], дискретні жорсткі тіла (частинки або елементи) взаємодіють між собою, передаючи сили та моменти через контакти. Однією з основних переваг DEM є те, що для моделювання не потрібно робити припущення щодо поведінки матеріалу на рівні континууму; натомість макроскопічна поведінка середовища виникає як результат великої кількості мікроскопічних взаємодій частинок [143]. У цьому сенсі метод є

достовірним відображенням фізичних процесів на мікрорівні. Водночас, значним обмеженням DEM залишається високий обчислювальний ресурс, необхідний для розрахунків, що обмежує тривалість симуляції та кількість частинок у ній.

Для дослідження процесу руйнування плодів і насіння рицини їх моделювали у вигляді скупчення частинок сферичної форми (рис. 2.2), які взаємодіють між собою відповідно до фізико-механічних характеристик матеріалу. Такий підхід дозволяє спростити геометрію моделі та забезпечити адекватне відображення процесів деформації й руйнування при зовнішньому навантаженні. Тому розглянемо процес взаємодії таких частинок з використанням відомого фізико-математичного апарату.



d_f – діаметр частинок сферичної форми, м; A_f, B_f, C_f – геометричні розміри плоду, м; A_s, B_s, C_s – геометричні розміри насіння, м

Рисунок 2.2 – Моделі плодів і насіння рицини у вигляді скупчення частинок сферичної форми

У DEM поступальний та обертовий рух кожної частинки обчислюється шляхом розв’язання другого закону Ньютона на кожному часовому кроці згідно з такими рівняннями:

$$m_i \frac{d\overline{v_i}}{dt} = \sum_j \left(\overline{F_{ij}^n} + \overline{F_{ij}^t} \right) + m_i \bar{g}, \tag{2.1}$$

$$I_i \frac{d\overline{\omega_i}}{dt} = \sum_j \left(\overline{R_{ij}} \times \overline{F_{ij}^t} - \overline{\tau_{ij}^r} \right), \tag{2.2}$$

де m_i – маса частинки, кг; I_i – момент інерції, кг·м^2; $\overline{v_i}$ – вектор поступальної швидкості частинки, м/с; $\overline{\omega_i}$ – вектор кутової швидкості частинки, с$^{-1}$; $\bar{g}$ – вектор прискорення вільного падіння, м/с^2; $\overline{F_{ij}^n}$, $\overline{F_{ij}^t}$ – нормальна і тангенціальна сили, прикладені до частинки і унаслідок взаємодії з частинкою j, Н; $\overline{\tau_{ij}^r}$ – момент опору коченню, прикладений до частинки і унаслідок взаємодії з частинкою j, Н·м; $\overline{R_{ij}}$ – вектор від центра мас частинки і до точки контакту з частинкою j, м.

Перед розв’язанням рівнянь руху визначаються сили та моменти, що виникають унаслідок контактної взаємодії частинок між собою або з межами області. Для цього використовуються три контактні моделі, зображені на рис. 2.3.

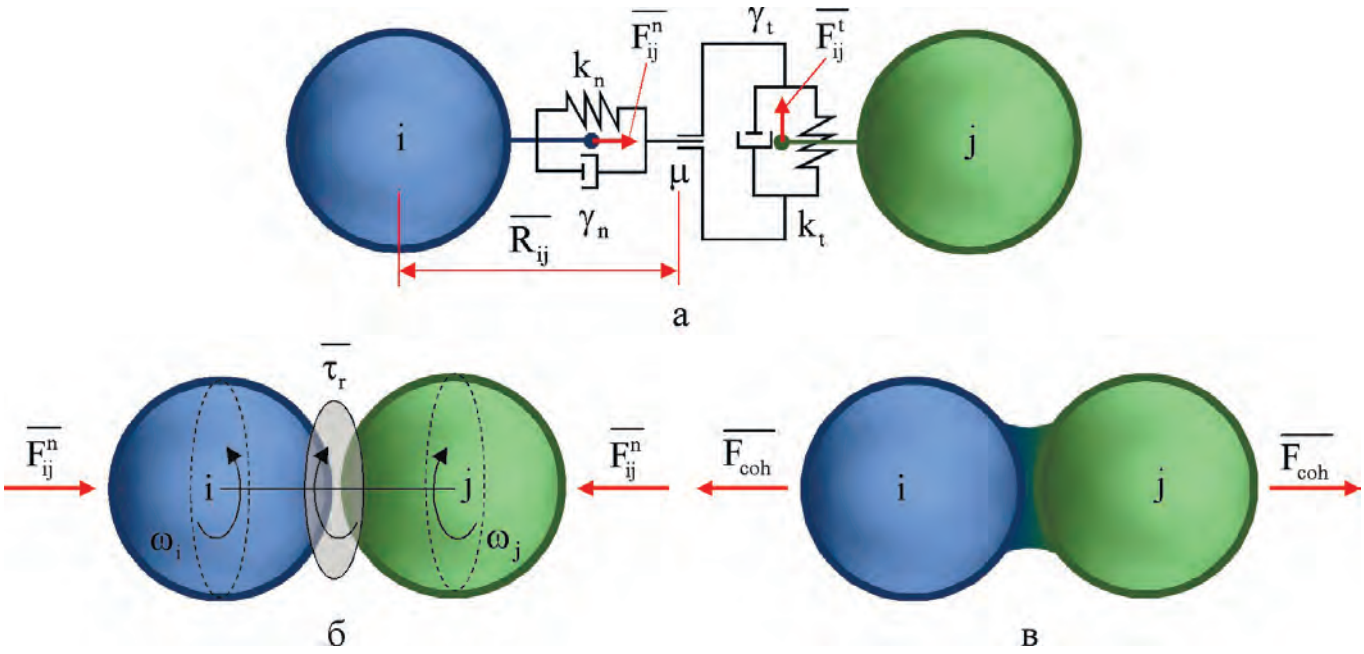
Нормальні та тангенціальні сили на точці контакту – $\overline{F_{ij}^n}$ і $\overline{F_{ij}^t}$ – моделюються за допомогою лінійної пружно-демпферної моделі Герца-Міндліна [144], яка включає пружну та в'язку складову (рис. 2.3, а). У цій моделі нормальні та дотичні сили мають еластичну та в’язку складові, що позначаються індексами e (еластична) та v (в’язка) і розкладаються відповідно до наступних рівнянь:

$$\overline{F_{ij}^n} = \overline{F_{ij}^{ne}} + \overline{F_{ij}^{nv}}, \tag{2.3}$$

$$\overline{F_{ij}^t} = \overline{F_{ij}^{te}} + \overline{F_{ij}^{tv}}, \tag{2.4}$$

Крім того, дотична сила визначається за законом тертя Кулона $\overline{F_{ij}^t} \le \mu \overline{F_{ij}^n}$, де μ – коефіцієнт тертя. У разі перевищення цього значення між частинками відбувається ковзання. Еластична сила в нормальному напрямку $\overline{F_{ij}^{ne}}$ базується на класичній теорії

Герца про контакт між двома сферами [145, 146]. У цій теорії передбачається наявність малих пружних деформацій, малих контактних поверхонь та еліпсоїдного розподілу контактних напружень.



а – модель Герца-Міндліна; б – модель обертального тертя з постійним напрямком моменту (CDT); в – спрощена модель когезії Джонсона-Кендалла-Робертса (SJKR)

Рисунок 2.3 – Узагальнені контактні моделі DEM

Еластична сила в дотичному напрямку $\overline{F_{ij}^{te}}$ ґрунтується на теорії Міндліна [147] і визначається як нормальним, так і дотичним перекриттям, відповідно $\overline{\delta_n}$ та $\overline{\delta_t}$. Дотичне перекриття $\overline{\delta_t}$ виникає внаслідок різниці дотичних швидкостей двох частинок у точці їхнього контакту. Ці моделі описують нелінійні залежності між нормальними еластичними силами та переміщеннями, які подаються у такому вигляді:

$$\overline{F_{ij}^{ne}} = -k_n \overline{\delta_n} = \frac{4}{3} E^* \sqrt{R^* \left|\overline{\delta_n}\right|}\,\overline{\delta_n}, \qquad (2.5)$$

$$\overline{F_{ij}^{te}} = -k_t \overline{\delta_t} = 8G^* \sqrt{R^* \left|\overline{\delta_n}\right|}\,\overline{\delta_t}\,, \qquad (2.6)$$

де k_n, k_t – нормальна та дотична жорсткості контакту, Н/м; $R^* = R_i R_j \big/ \left(R_i + R_j\right)$ – еквівалентний радіус двох тіл у контакті, м; R_i – радіус і-тої частинки, м; $G^* = \left(2\left(2-\nu_i\right)\left(1+\nu_i\right)/E_i + 2\left(2-\nu_j\right)\left(1+\nu_j\right)/E_j\right)^{-1}$ – еквівалентний модуль зсуву, Па; $E^* = \left(\left(1-\nu_i^2\right)/E_i + \left(1-\nu_j^2\right)/E_j\right)^{-1}$ – еквівалентний модуль Юнга, Па; ν_i – коефіцієнт Пуассона і-тої частинки; E_i – модуль Юнга і-тої частинки, Па.

В'язкі складові у рівняннях (2.3) та (2.4) дозволяють системі розсіювати енергію для досягнення стаціонарного ущільненого стану за розумний час. У початковому формулюванні було запропоновано вираз для критичного коефіцієнта демпфування β, заснований на часі критичного демпфування системи з одним ступенем вільності типу «пружина-маса-демпфер». У [148] запропоновано, що критичний коефіцієнт демпфування β виводиться з коефіцієнта відновлення e – фізичного параметра частинок, який характеризує втрати енергії під час зіткнення та пластичного деформування, – таким чином, що $\beta = -\ln(e) \big/ \sqrt{\ln(e)^2 + \pi^2}$. Коли $\beta = 1$, система вважається критично демпфованою та досягає стаціонарного ущільнення за мінімально можливий час. В'язкі нормальна та дотична сили виражаються наступним чином:

$$\overline{F_{ij}^{nv}} = -\gamma_n \overline{v_n} = -2\sqrt{\frac{5}{6}}\beta\sqrt{S_n m^*}\,\overline{v_n}\,, \qquad (2.7)$$

$$\overline{F_{ij}^{nt}} = -\gamma_t \overline{v_t} = -2\sqrt{\frac{5}{6}}\beta\sqrt{S_t m^*}\,\overline{v_t}\,, \qquad (2.8)$$

де γ_n і γ_t – коефіцієнти в'язко-пружного демпфування в нормальному та дотичному напрямках відповідно, Н·с/м; $\overline{v_n}$, $\overline{v_t}$ – нормальна та дотична складові відносної швидкості в точці контакту, м/с; $m^* = m_i m_j \big/ \left(m_i + m_j\right)$ – еквівалентна маса, кг; $S_n = 2E^* \sqrt{R^* \left|\overline{\delta_n}\right|}$, $S_t = 8G^* \sqrt{R^* \left|\overline{\delta_n}\right|}$ – відповідно нормальна та дотична жорсткості, Н/м.

Спротив коченню описує моменти, що передаються в зоні контакту між частинками. Коли дві частинки притискаються одна до одної під дією нормального навантаження, у зоні контакту виникає здатність до передачі моменту завдяки силам тертя, що розподіляються по поверхні контакту. Таким чином, величина спротиву коченню є пропорційною до нормальної сили — джерела контактної поверхні — та коефіцієнта тертя. Розрахунок цього моменту здійснюється на основі моделі тертя при коченні, зображеної на рис. 1, б.

Існує кілька моделей спротиву коченню [149, 150, 151], однак модель постійного напрямку моменту (Constant Directional Torque, CDT) є однією з найпоширеніших у дослідженнях DEM завдяки своїй відносній точності та обчислювальній ефективності. У цій моделі опірний момент $\overline{\tau_{ij}^{r}}$ є пропорційним до нормальної сили $\overline{F_{ij}^{n}}$ і спрямований у напрямку відносного кочення $\overline{\omega_{ij}}\Big/\left|\overline{\omega_{ij}}\right|$. Його вираз має такий вигляд:

$$\overline{\tau_{ij}^{r}} = -\mu_r R^{*} \left|\overline{F_{ij}^{n}}\right| \times \frac{\overline{\omega_{ij}}}{\left|\overline{\omega_{ij}}\right|}, \qquad (2.9)$$

де μ_r – коефіцієнт тертя при коченні, $\overline{\omega_{ij}}$ – відносна кутова швидкість частинки і відносно частинки j, c^{-1}.

Хоча тертя при коченні частково успішно використовували для моделювання форми частинок [152], досі не з’ясовано, чи є воно дійсно фізичною властивістю [151].

Додатково слід зазначити, що впровадження моменту спротиву коченню у DEM-моделюванні дозволяє точніше відтворювати реальні механічні взаємодії, особливо в системах із великою кількістю частинок або у випадках, коли поведінка частинок при коченні суттєво впливає на загальну динаміку системи.

Для моделювання зв’язків між частинками, що виникають унаслідок спікання, розглянуто додаткову когезійну модель, зображену на рис. 2.3, в. Існує кілька моделей зв’язків, зокрема: модель подвійної пружини [153], модель Ейлера-Бернуллі [154, 155], модель когезійної балки [156, 157], модель зв’язаних частинок (Bonded Particle Model) [158, 159], векторна модель [160], а також модель паралельного

зв’язку (Parallel Bond Model) [132]. Усі ці підходи описують жорсткий зв’язок між частинками, який утворюється на початку симуляції й зберігається доти, доки не відбудеться його руйнування. Внаслідок цього такі моделі зазвичай придатні лише для короткочасних симуляцій із обмеженим типом взаємодій.

Натомість модель Джонсона-Кендалла-Робертса (JKR) [161] реалізується шляхом додавання додаткової нормальної сили – так званої сили відриву, яка спрямована на збереження контакту між частинками. Сила відриву відповідає зусиллю, необхідному для роз'єднання двох частинок без перекриття. Така сила може зникати і з’являтися знову в процесі симуляції залежно від наявності контакту, що дозволяє зв’язкам динамічно руйнуватися і утворюватися знову. Модель JKR була вперше розроблена на основі спостережень за утворенням «шийок» у зоні контакту адгезійних тіл. Вона враховує електростатичні взаємодії, зокрема сили Ван дер Ваальса, а також інші фізико-хімічні ефекти міжповерхневої взаємодії, тому її формулювання залежить від поверхневої енергії матеріалу γ.

Для моделювання застосовується спрощений варіант моделі JKR – модель SJKR, у якій не враховується приріст площі, викликаний утворенням шийки, а ефективна контактна площа визначається як площа перетину двох частинок. Когезійна сила в моделі SJKR розраховується за наступною формулою:

$$\left|\overline{F_{coh}}\right| = \Omega \pi a^2, \qquad (2.10)$$

де Ω – питома густина когезійної енергії на одиницю об’єму, Дж/м^3; a – площа кругового контакту, м^2.

Ця когезійна сила також неявно описує опір міжчастинкового зв’язку до зсуву та згину. Оскільки максимальна дотична сила $\overline{F_{ij}^{t}}$ і момент спротиву $\overline{\tau_{ij}^{r}}$ є пропорційними до нормальної сили, їх значення зростають із додатковою нормальною силою, що зумовлена когезією $\left|\overline{F_{coh}}\right|$.

На відміну від традиційних моделей фіксованих зв’язків, у яких руйнування відбувається лише один раз і є незворотнім, модель SJKR дозволяє динамічно моделювати руйнування когезійних контактів внаслідок механічного впливу. Зокрема, зв’язок між частинками зникає, коли відстань між ними перевищує межу

безконтактної взаємодії або коли нормальна сила перевищує порогове значення когезійної міцності.

Це означає, що руйнування зв’язку в моделі SJKR може відбуватись багаторазово упродовж симуляції, відтворюючи реальні умови, за яких частинки в сипкому середовищі постійно втрапляють у контакт і розривають його. Такий підхід є особливо важливим для моделювання динамічних процесів, наприклад, у фазі пресування або механічного перемішування, коли навантаження на зв’язки змінюється з часом.

Крім того, оскільки максимальні дотичні сили та моменти опору прямо пропорційні до нормальної сили, руйнування когезійного зв’язку також означає втрату зсувної та згинальної жорсткості, що істотно змінює локальну механіку контактної пари. Таким чином, модель SJKR забезпечує реалістичне описання моменту втрати зв’язку між частинками, що є критичним для аналізу руйнування структури агломератів або перехідних контактних систем.

2.4 Чисельне моделювання процесу руйнування плодів і насіння рицини стиском

Для дослідження процесів механічного руйнування плодів і насіння рицини під дією стискаючого навантаження доцільно використовувати метод дискретних елементів (DEM) у поєднанні з низкою фізичних моделей, реалізованих у середовищі Simcenter Star-CCM+. Оскільки структура плодів рицини є багатофазною, включаючи тверду оболонку і м’яке насіння, а також демонструє виражену контактну і фрагментаційну поведінку під навантаженням, найбільш релевантним підходом є безсіточне моделювання з використанням DEM у Лагранжевій постановці.

Для подальшого моделювання обрані наступні моделі.

1. Безсіточний DEM. Цей підхід дозволяє моделювати поведінку великої кількості тіл у вигляді частинок без потреби в побудові класичної сітки скінченних елементів. Кожна частинка (насіння або фрагмент плоду) розглядається як окреме

тіло з індивідуальними властивостями. Безсіточна реалізація особливо зручна при моделюванні руйнування, оскільки структура змінюється динамічно – частинки можуть зіштовхуватись, роз'єднуватись або зникати внаслідок знищення. У випадку рицини це дозволяє точно відтворити розколювання оболонки.

2. Граничні сили DEM. Цей компонент моделі визначає сили взаємодії між частинками, а також між частинками і твердими стінками (індентором, циліндром, поршнем тощо). Вибір моделей граничних сил дозволяє зафіксувати параметри тертя, пружності, амортизації та зчеплення, що особливо важливо для моделювання механічного руйнування оболонки плоду. У контексті рицини застосовуються пружні (наприклад, лінійна пружність Гука) та в'язко-пластичні моделі, які описують опір матеріалу до деформації та подальший зсув.

3. Інтерполяція рішення. Оскільки DEM працює в Лагранжевій системі координат, необхідна регулярна інтерполяція параметрів (наприклад, температури, тиску або швидкості) з обчислювальної сітки, якщо система взаємодіє з іншими фазами. Це забезпечує коректну передачу навантажень від суцільного середовища (наприклад, стінок індентора) до частинок насіння.

4. Лагранжева багатофазність. Цей підхід передбачає окремий опис кожної фази частинок:

– частини DEM – дозволяють задавати різні фізико-механічні властивості (модуль Юнга, коефіцієнт тертя, критичне зусилля розриву) для оболонки й ядра насіння;

– час існування – задає обмеження на тривалість існування частинки в обчислювальній зоні, корисно для моделювання викидання уламків;

– постійна щільність – дозволяє задавати матеріальні властивості окремих фаз, зокрема щільність оболонки і насіння;

– скупчення частинок – відображає реальну поведінку частинок під дією агломерації або злипання після руйнування;

5. Багатофазна взаємодія:

– модель одиночного руйнування – ключовий компонент для симуляції розколювання оболонки рицини. Вона дозволяє вказати критичне значення

навантаження або деформації, при перевищенні якого частинка фрагментується. Після руйнування частинка замінюється на набір менших фрагментів із відповідною імпульсною передачею;

– опір коченню – важливий для коректного моделювання тертя між елементами плоду, особливо при деформації або зсуві;

– зчеплені частинки – застосовуються до оболонки рицини, яка розглядається як агломерат зчеплених субчастинок; дозволяє імітувати поступове руйнування за допомогою втрачених контактів;

– фазова взаємодія DEM – описує передавання сил між окремими матеріальними фазами, наприклад, між оболонкою і вмістом насіння при деформації;

– лінійне зчеплення – визначає початкове когезійне зчеплення між частинками оболонки, що контролює поріг її руйнування під тиском.

6. Модель дискретних елементів. DEM реалізує облік всіх контактних взаємодій між частинками, включаючи силу нормального відштовхування, дотичну силу тертя, момент кочення та зчеплення. В Simcenter Star-CCM+ це дозволяє задати:

– контактні параметри: модуль пружності, коефіцієнти відновлення, тертя, згину;

– геометрію: розміри, форму, розподіл частинок (наприклад, роздільно для насіння й оболонки);

– критерії руйнування: наприклад, лінійний або енергетичний критерій.

7. Нестаціонарний неявний розрахунок. Обчислення ведеться у нестаціонарному режимі з неявною схемою інтегрування, що дозволяє забезпечити стійкість розрахунку навіть при наявності жорстких контактів, високих швидкостей руйнування або великої кількості взаємодій. Це критично для симуляції швидкого стиску й одночасного руйнування оболонки.

8. Сила тяжіння. Урахування сили тяжіння необхідне для забезпечення реалістичного розташування частинок у камері перед початком стиснення.

Гравітація також впливає на кінетику падіння фрагментів після руйнування та подальше ущільнення залишків насіння.

Обраний комплекс моделей у Simcenter Star-CCM+ дозволяє з високою фізичною достовірністю відтворити руйнування плодів і насіння рицини при стиску. Модель DEM у поєднанні з багатофазною Лагранжевою постановкою, модель одиничного руйнування та реалізація зчеплення частинок створюють умови для імітації ключових фізичних явищ: фрагментації, втрати контактів, злипання залишків та переносу уламків. Методика дає змогу прогнозувати механічну міцність, характер руйнування та ефективність подрібнення при переробці насіння рицини, що має прикладне значення для технологій видобування олії.

Схема моделювання процесу руйнування плодів і насіння рицини стиском наведена на рис. 2.4.

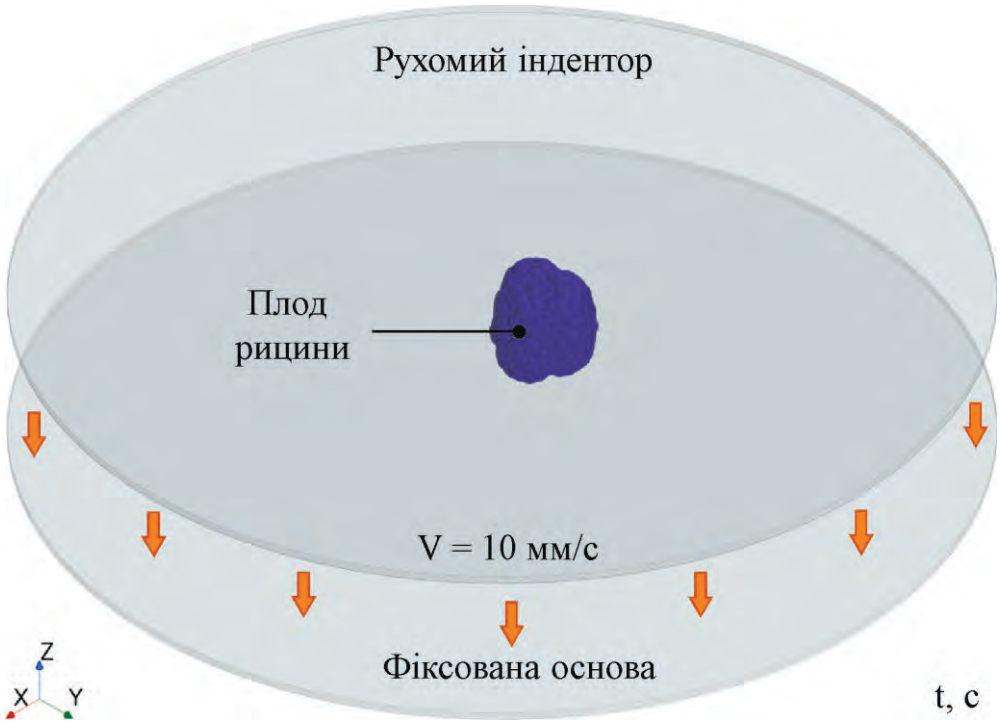


Рисунок 2.4 – Схема моделювання процесу руйнування плодів і насіння рицини стиском

Фізико-механічні властивості плоду та насінини рицини, прийняті для моделювання згідно з розділом 4.1, зведені в таблицю 4.1. Додатково враховано реологічні властивості, які наведені в таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 – Реологічні властивості плоду та насінини рицини

Показник	Плід	Насіння
Діаметр складових частинок d, мм	14	8
Коефіцієнт Пуассона ν	0,36	0,24
Модуль пружності Юнга E, МПа	85	210
Питома густина когезійної енергії на одиницю об'єму Ω, Дж/м^3	1200	4500
Граничне напруження розтягу та зсуву W, МПа	1,8	6,5

Процес руйнування плоду рицини під дією стискаючого навантаження, згідно з результатами чисельного моделювання, має складну багатофазну природу (рис. 2.5). На початковому етапі (до ~0,5 с) спостерігається поступове зростання сили від 0 до приблизно 49 Н, що відповідає пружній деформації зовнішньої оболонки плоду. У цей момент структура плоду чинить опір деформації без видимих пошкоджень – оболонка стискається, накопичуючи пружну енергію.

У проміжку між 0,55 і 0,9 с відбувається інтенсивне зростання сили до значення до ~100 Н, що свідчить про локальні порушення цілісності оболонки та початок її руйнування. У цей період можуть виникати мікротріщини в ендокарпі (твердій оболонці), що поступово поширюються, призводячи до зменшення жорсткості системи. У межах 0,9–1,0 с спостерігається відносно стабільне значення сили (плато) – це може бути наслідком поступового руйнування внутрішнього ядра плоду та перерозподілу навантаження між частинами, що ще залишаються цілими.

Далі, в діапазоні 1,0–2,1 с, сила стрімко зростає до свого максимального значення ~170 Н, що відповідає кульмінаційній фазі руйнування, під час якої відбувається повна втрата структурної цілісності плоду. Це момент, коли зовнішня оболонка і внутрішні компоненти розтріскуються або розламуються, перетворюючись на окремі частинки. Після цього, у дуже короткий період (~0,1 с), спостерігається різке падіння сили до рівня 45 Н, що вказує на повне руйнування плоду – залишки не чинять суттєвого опору стисканню.

Цікаво, що після цього починається повторне зростання сили до ~110 Н (2,2–3,0 с). Цей етап пов'язаний з ущільненням уламків, які утворилися внаслідок руйнування, а також їх додатковим стисканням та фрагментацією. У завершальній

фазі (після 3,0 с) сила зменшується, що свідчить про насичення процесу деформації – подальше прикладення навантаження вже не спричиняє помітного збільшення опору через відсутність структурної цілісності.

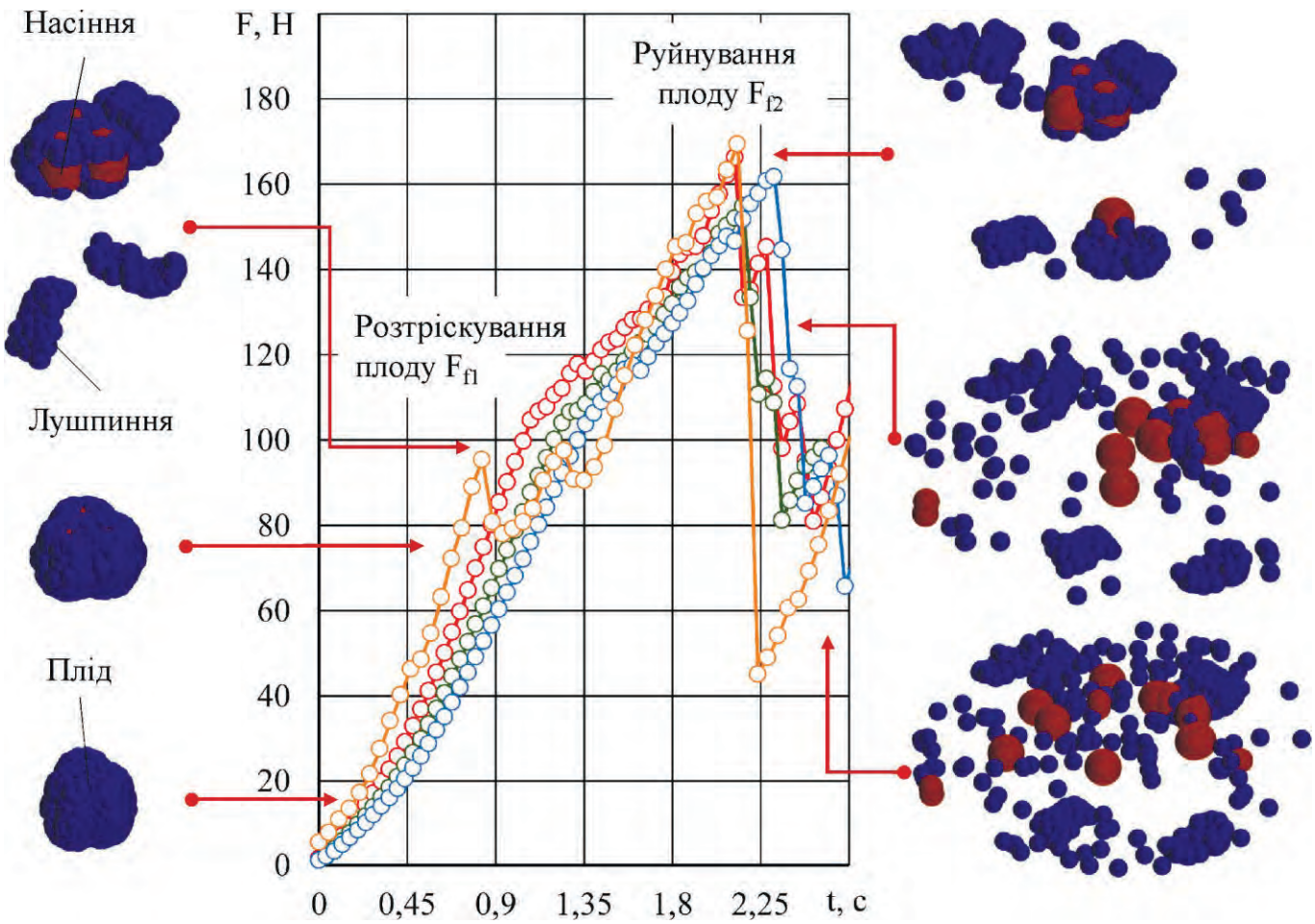


Рисунок 2.5 – Приклади залежностей сили F стиску плодів рицини від часу t по результатам чисельного моделювання

З фізичної точки зору цей процес охоплює три ключові стадії: пружну деформацію, руйнування оболонки та ядра і ущільнення залишків після руйнування. Розподіл навантаження в тілі плоду змінюється у часі внаслідок послідовного руйнування шарів – від зовнішньої твердої оболонки до внутрішніх м’яких тканин. Величина та тривалість піків навантаження залежить як від геометрії плоду, так і від механічних властивостей оболонки, м’якоті та наявності пустот. Результати чисельного моделювання дають змогу глибше зрозуміти механізм поступового

руйнування біологічного об'єкта під стиском і можуть бути використані для калібрування моделей дискретних елементів (DEM) у програмному забезпеченні типу Simcenter Star-CCM+.

Процес руйнування насіння рицини під дією стискаючого навантаження, згідно з чисельним моделюванням, характеризується неперервним зростанням сили опору деформації до певного критичного моменту, після чого спостерігається різке зменшення сили – це типовий сценарій руйнування біологічних матеріалів (рис. 2.6).

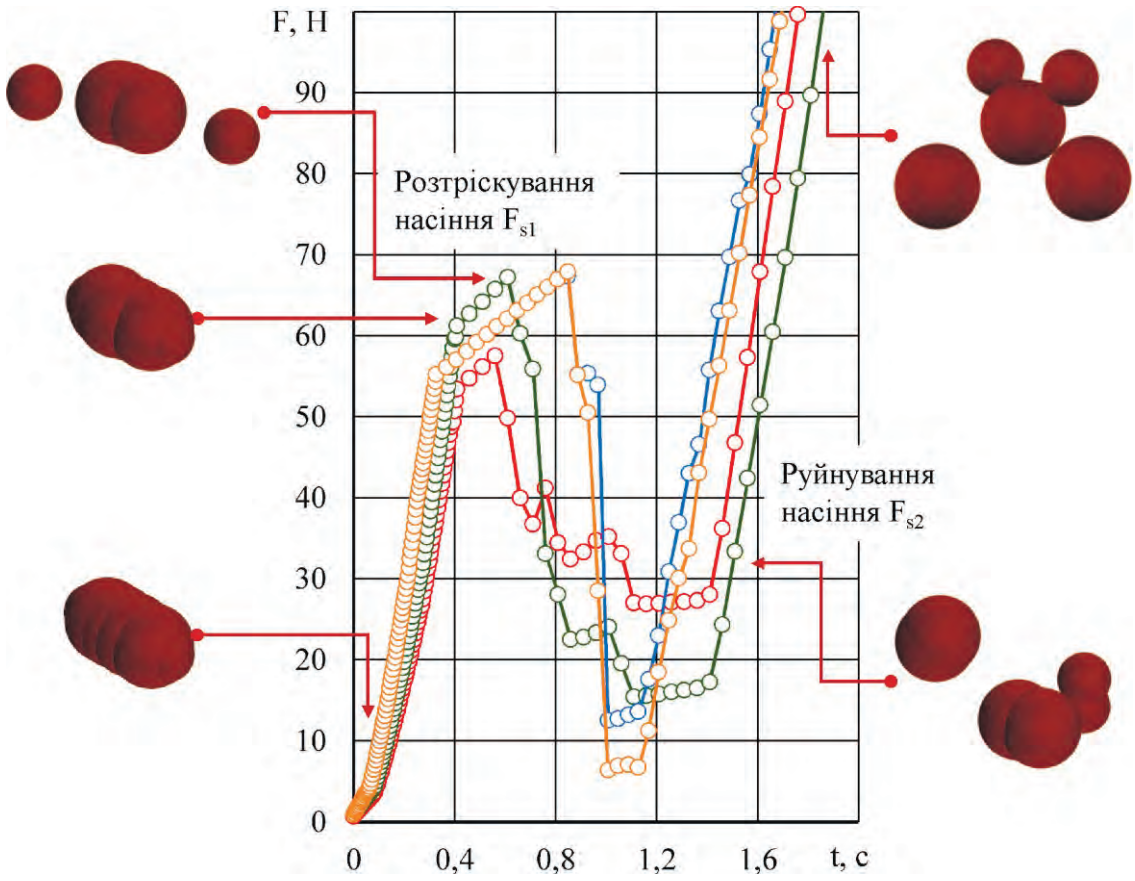


Рисунок 2.6 – Приклади залежностей сили F стиску насіння рицини від часу t по результатам чисельного моделювання

На початковому етапі (0–0,4 с) спостерігається майже лінійне зростання сили від 0 до приблизно 60 Н. Цей інтервал відповідає пружній деформації зовнішньої оболонки насінини, яка поступово стискається. Частка пружної енергії накопичується в структурі без її порушення. З фізичної точки зору, у цей момент усі

мікроструктури (оболонки, клітинні стінки) працюють у межах пружності. До 0,41–0,46 с значення сили зростає до ~62 Н, а згодом відбувається часткова стабілізація або сповільнення зростання навантаження, що свідчить про початок локального руйнування – можливо, мікротріщини в оболонці або часткове її розщеплення.

Після 0,46 с спостерігається перехідна фаза, у якій сила стиснення зростає повільніше, досягаючи локального максимуму близько 67 Н на 0,61 с. Одразу після цього починається різке падіння сили: на 0,66 с вона становить уже лише 60 Н, а на 0,71 с – 55 Н, що вказує на фазу активного руйнування насінини. У проміжку 0,76–1,06 с сила стискання значно знижується – від 33 Н до 19 Н. Це свідчить про втрату цілісності структури, а також про руйнування і переміщення внутрішніх фрагментів насінини, які більше не чинять значного опору.

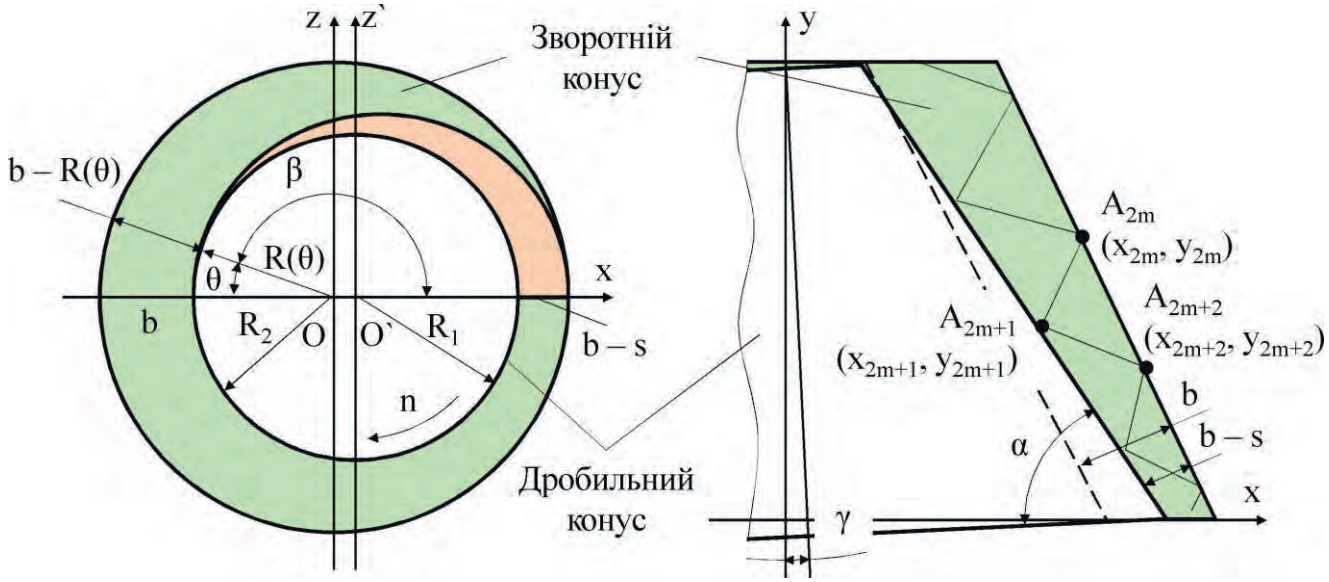
Із моменту 1,11 с відбувається відновлення навантаження: сила знову починає поступово зростати, що пояснюється ущільненням подрібнених залишків насіння та їх подальшим стисканням. Починаючи з 1,41 с, темпи зростання сили різко зростають, досягаючи нового максимуму близько 89,6 Н на 1,81 с. Це може бути зумовлено додатковим механічним опором від ущільнених уламків або стискання залишків твердої частини ядра насінини.

З фізичної точки зору, процес руйнування насінини рицини під стиском проходить через кілька етапів: пружна деформація; початок руйнування; руйнування зовнішніх і внутрішніх структур, що супроводжується падінням сили; механічне ущільнення та фрагментація залишків; фінальна фаза досягнення нового максимуму в умовах повністю зруйнованої структури, що обумовлено залишковим опором компактного залишку.

Порівнюючи отримані залежності чисельного моделювання (рис. 2.5–2.6) із результатами лабораторних досліджень (рис. 4.6–4.7) зазначимо що їх характер є тотожнім, що свідчить про можливість подальшого використання чисельного моделювання при дослідженні і обґрунтуванні конструктивно-технологічних параметрів машини для очищення насіння рицини.

2.5 Теоретичні дослідження стиску плодів рицини під дією робочих органів машини

Тиск на поверхні робочих органів машини для очищення насіння рицини визначається ступенем стиснення I та геометричним розміром плоду A_f, B_f, C_f [162, 163]. Крім того, ступінь стиснення залежить від швидкості обертання дробильного конусу та конструктивних параметрів дробильного і зворотного конусів, так само як і тиск руйнування, що ілюструється на рисунку 2.7. Максимальне значення тиску спостерігається у положенні найменшого зазору, тоді як мінімальний тиск (наближено рівний нулю) має місце у положенні найбільшого зазору.



а б

а – розподіл тиску на поверхні дробильного і зворотного конусів; б – траєкторія руху плодів рицини

Рисунок 2.7 – Поперечний переріз камери руйнування в машині для очищення насіння рицини

Тиск на поверхню футеровки можна описати рівнянням (2.11):

$$p = p\left(I, \max\left(A_f,\ B_f,\ C_f\right)\right), \tag{2.10}$$

де p – тиск на поверхні робочих органів машини для очищення насіння рицини, Па; I – ступінь стиснення.

Для аналізу тиску на футеровці дробильного конусу, ступінь стиснення I повинен бути виражений через конструктивні параметри камери руйнування. Ступінь стиснення, тобто відношення ходу s до початкової висоти b до моменту стиснення, розраховується за рівнянням (2.11):

$$I(\theta) = \frac{s(\theta)}{b}, \tag{2.11}$$

де b – висота матеріалу до початку стиснення, а s(θ) – хід дробильного конусу при повороті на кут θ.

Початкова висота шару матеріалу перед стисненням b обчислюється за рівнянням:

$$b = R_2 + \frac{s_0}{2} - R_1, \tag{2.12}$$

де R_2 – радіус зворотного конусу, м; R_1 – радіус дробильного конусу, м; s_0 – хід, який є початковим для функції s(θ), м.

Функція s(θ) описує зміну ходу залежно від кута повороту та відображає процес стиснення. Вона розраховується за рівнянням:

$$s(\theta) = R(\theta) + \frac{s_0}{2} - R_1, \tag{2.13}$$

де

$$R(\theta) = \sqrt{R_1^2 - \frac{s_0^2 \sin^2\theta}{4}} - \frac{s_0 \cos\theta}{2}, \tag{2.14}$$

$$s = 2\gamma\sqrt{R_1^2 + y^2}, \tag{2.15}$$

де γ – кут нахилу дробильного конусу (амплітуда прецесії), °; y – зміщення по вертикалі або геометричний параметр, м; s – постійний параметр ходу, м.

Нарешті, ступінь стиснення може бути визначений за рівняннями (2.11)–(2.15). Однак на цей параметр також впливає швидкість обертання дробильного конусу. Для забезпечення високої продуктивності машини для очищення насіння рицини бажано застосовувати більшу швидкість. Проте за високих швидкостей фактичний ступінь стиснення I_{act} може бути меншим за номінальний ступінь

стиснення I, оскільки плоди рицини проходять через камеру машини шляхом вільного падіння та часткового стиснення, як зображено на рисунку 2.7, б.

Очевидно, що фактичний хід s_{act} буде меншим за номінальний s, якщо футеровка дробильного конусу швидко віддаляється від матеріалу. Наприклад, розглянемо зону руйнування (рис. 2.7, б). Спочатку матеріал вільно падає з точки A_{2m} до A_{2m+1}. Час вільного падіння позначається як t_{2m+1}. Далі відбувається стискання матеріалу з A_{2m+1} до A_{2m+2} з відповідним часом стиснення t_{2m+2}. Координати відповідних точок: $A_{2m} – (x_{2m}, y_{2m})$, $A_{2m+1} – (x_{2m+1}, y_{2m+1})$, $A_{2m+2} – (x_{2m+2}, y_{2m+2})$. Параметр n – це швидкість обертання дробильного конусу, а k – коефіцієнт фактичного ходу. Якщо задані координати початкової точки, то фактичний хід і висоту шару плоду рицини можна визначити за схемою та рівняннями у вигляді послідовності математичних дій:

$$\frac{y_{2m+2}-y_{2m+1}}{x_{2m+2}-x_{2m+1}}=\operatorname{tg}(\alpha-\gamma), \tag{2.16}$$

$$y_{2m+1}-y_{2m}=\frac{1}{2}gt_{2m+1}^2, \tag{2.17}$$

$$t_{2m+1}+t_{2m+2}+0,01=\frac{60}{n}, \tag{2.18}$$

$$\frac{2\gamma n t_{2m+2}}{30}=\operatorname{arctg}\frac{y_{2m+2}}{x_{2m+2}}-\operatorname{arctg}\frac{y_{2m}}{x_{2m+1}}, \tag{2.19}$$

$$x_{2m+2}=x_{2m}+\frac{2\gamma n t_{2m+2}}{30}\sqrt{x_{2m}^2+y_{2m+1}^2}\sin\left(\operatorname{arctg}\frac{y_{2m+2}}{x_{2m+2}}-\frac{2\gamma n t_{2m+2}}{30}\right), \tag{2.20}$$

$$y_{2m+2}=y_{2m+1}+\frac{2\gamma n t_{2m+2}}{30}\sqrt{x_{2m}^2+y_{2m+1}^2}\cos\left(\operatorname{arctg}\frac{y_{2m+2}}{x_{2m+2}}-\frac{2\gamma n t_{2m+2}}{30}\right), \tag{2.21}$$

$$k_{2m+2}=\frac{nt_{2m+2}}{30}, \tag{2.22}$$

$$\beta=k\pi, \tag{2.23}$$

$$s_{act}(\theta)=s(\theta+\beta-\pi), \tag{2.24}$$

$$b_{act}=R_2+\frac{s_{act}(\pi)}{2}-R_1. \tag{2.25}$$

Фактичний ступінь стиснення I_{act} можна подати у вигляді рівняння:

$$I_{act}(\theta) = \frac{s_{act}(\theta)}{b_{act}} = \frac{s(\theta + \beta - \pi)}{R_2 + \frac{s_{act}(\pi)}{2} - R_1}. \quad (2.26)$$

Згідно лабораторних досліджень розмір плодів рицини складає: довжина L = 14,8 ± 2,2 мм та ширина B = 13,5 ± 1,9 мм. З урахуванням дисперсії, максимальні габарити плодів можуть досягати 17–18 мм, що є критично важливим при проєктуванні робочої зони машини для очищення насіння. Щоб забезпечити ефективне захоплення і стиснення плодів у дробильній камері, необхідно враховувати ці значення при визначенні розмірів отворів та амплітуди стиснення. На основі моделі тиску руйнування, описаної рівняннями (2.10)–(2.26), обґрунтовано конструктивні параметри дробильної системи (рис. 2.8).

Діаметр дробильного конуса прийнято рівним D_1 = 480 мм, а діаметр зворотного конуса – D_2 = 520 мм. Різниця між радіусами визначає початковий зазор між робочими поверхнями у найбільш відкритому положенні, який становить ΔR = 20 мм.

Це значення є більшим за максимальний поперечний розмір плодів рицини (~18 мм), що гарантує їх вільне надходження до зони стиснення.

Початкова висота шару матеріалу перед стисненням b, відповідно до рівняння (2.12) b = 25 мм.

Це значення b більше за висоту плодів рицини (14–18 мм), що дозволяє плодам вільно розміщуватися у камері перед початком стискання, і водночас створює запас для ефективного стиснення без деформації насіння.

При b = 25 мм і амплітуді ходу $s(\theta)$ = 10–15 мм, отримаємо ступінь стиснення, що визначається за рівнянням (2.11) $I(\theta) \approx 0{,}4–0{,}6$, що відповідає оптимальному діапазону для руйнування оболонок рицини з урахуванням їх механічної міцності згідно розділів 2.4 і 4.1. Занадто високий ступінь стиснення (>0,8) може призводити до руйнування самого насіння, а занадто малий (<0,3) — до неповного руйнування плодів.

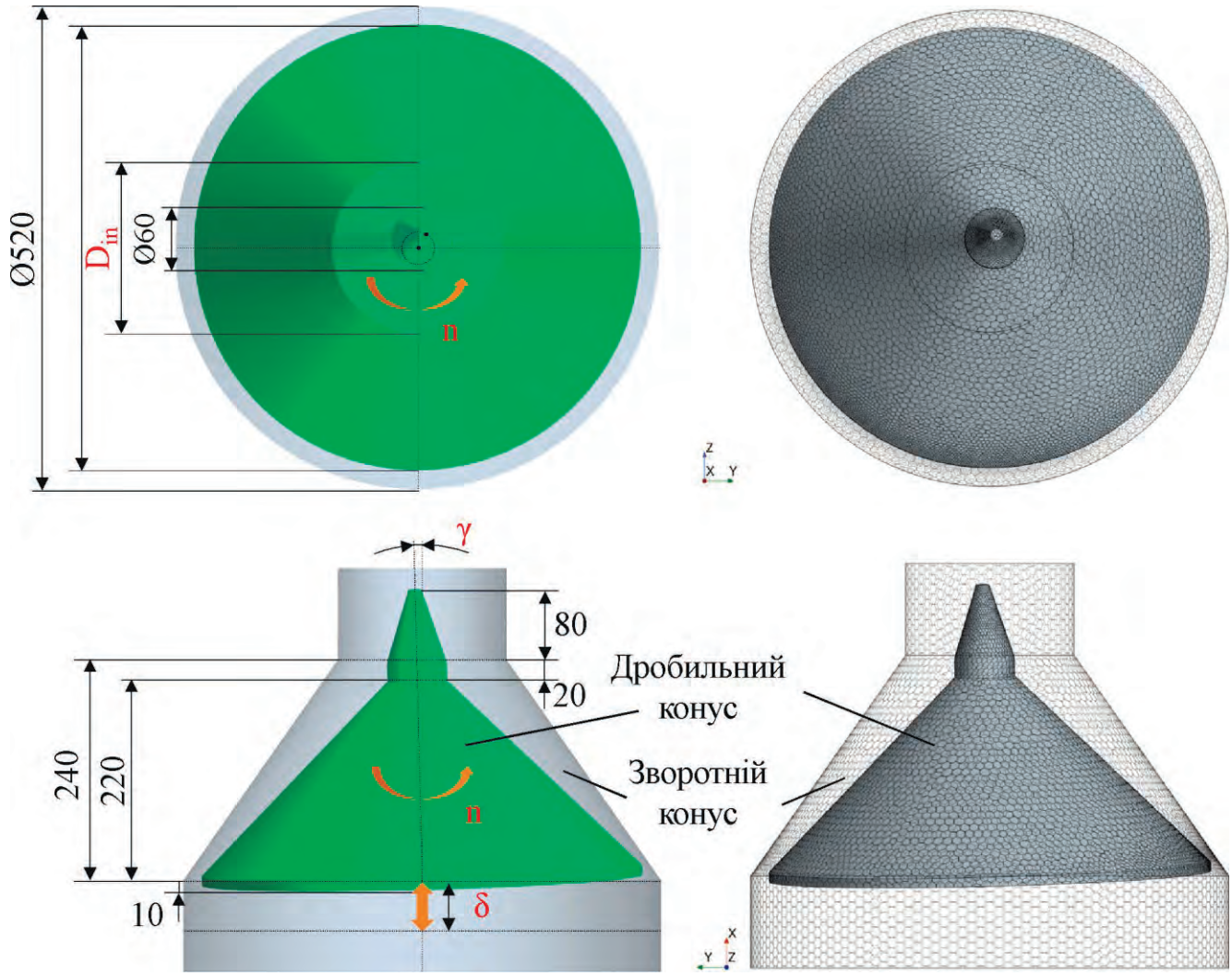


Рисунок 2.8 – Геометричні розміри робочих органів машини для очищення насіння рицини

Враховуючи рух плодів шляхом вільного падіння (рис. 2.7, б), важливо забезпечити достатню висоту робочих органів. Прийняті значення: висота зворотного конуса – 240 мм, дробильного – 220 мм. При цьому висота контактної зони майже в 13–15 разів перевищує габарити плодів, що забезпечує поступове стискання у кілька стадій і рівномірний розподіл навантаження вздовж вертикальної осі.

Кут нахилу робочої поверхні дробильного конуса в межах 0–4° забезпечує поєднання самоподачі плодів під дією сили тяжіння з ефективним фіксуванням у зоні стиснення. Мала величина кута дозволяє формувати майже паралельну робочу

зону, що відповідає гіпотезі рівномірного розподілу тиску по поверхні у рівнянні (2.10) і забезпечує умови для стабільної та прогнозованої роботи машини.

Таким чином, запропоновані конструктивні параметри – діаметри дробильного (480 мм) та зворотного (520 мм) конусів, їх висота (220 і 240 мм відповідно), та кут нахилу 0–4°, – повністю узгоджуються з геометрією плодів рицини і забезпечують ефективне очищення насіння без пошкодження ядра. Це обґрунтування базується на розрахункових рівняннях (2.10)–(2.26) і враховує як кінематичні, так і конструктивні особливості машини.

2.6 Чисельне моделювання процесу відокремлення і очищення насінин рицини від плодів під дією робочих органів машини

Чисельне моделювання процесу відокремлення і очищення насінин рицини від плодів під дією робочих органів машини проведено в середовищі Simcenter Star-CCM+ із використанням детермінованого підходу дискретних елементів (DEM) у поєднанні з механікою суцільного середовища (додаток Б).

Для забезпечення коректного відображення геометрії, контакту та деформаційних процесів у робочій зоні було прийнято наступні сіткові моделі: генератор багатогранних комірок і поверхневої сітки. Генератор багатогранних комірок обрано як основний засіб побудови об’ємної обчислювальної сітки для забезпечення високої якості моделі при меншій кількості комірок, що важливо для складної геометрії контактної взаємодії плодів рицини з робочими органами. Генератор поверхневої сітки застосовано для попередньої оптимізації геометрії з метою рівномірного покриття поверхонь та кращої відповідності імпортованим CAD-моделям. Базовий розмір сітки 0,01 м обрано з урахуванням геометричних розмірів плодів рицини (довжина L = 14,8 ± 2,2 мм, ширина B = 13,5 ± 1,9 мм), що забезпечує достатню точність просторового опису об’єкта дослідження при помірному обчислювальному навантаженні.

В середовищі Simcenter Star-CCM+ було реалізовано комплексний підхід, що охоплює взаємодію твердих тіл, газового середовища та контактної механіки

частинок. Фізичну модель побудовано на основі середніх за Рейнольдсом рівнянь Нав’є–Стокса, які описують рух в’язкого стисливого газу, з урахуванням рівняння стану ідеального газу. Це дозволяє точно описувати поведінку повітряного середовища, особливо в зонах локального стиснення та прискорення повітряного потоку в робочій зоні машини. Для врахування турбулентності застосовано модель k-ε, яка є однією з найбільш універсальних та стійких до розрахункових похибок моделей, і забезпечує опис як великих, так і малих вихорів у потоці.

Для відображення руху частинок плодів рицини та продуктів їх руйнування реалізовано лагранжеву багатофазну модель, у якій кожна частинка розглядається як незалежний об’єкт із власними кінематичними та фізичними характеристиками. У цьому контексті плід рицини змодельовано як сукупність частинок дискретних елементів (DEM), з урахуванням таких моделей як постійна щільність, скупчення частинок, що дозволяє відтворити складну внутрішню структуру плодів, зокрема багатокомпонентність, різну міцність оболонки та ядра.

Для моделювання взаємодії між частинками та навколишнім середовищем застосовано багатофазну взаємодію, що включала: опір коченню для опису перекочування насіння; фазову взаємодію DEM для обміну імпульсом між фазами; модель Герца–Міндліна для розрахунку контактних сил; зчеплені частинки для врахування когезійних зв’язків; модель одиночного руйнування для визначення моменту руйнування частинки під навантаженням.

Розрахунки проводилися у нестаціонарному неявному режимі, що дало змогу враховувати зміну навантаження з часом і уникнути нестабільностей, пов’язаних із великими часовими кроками. Сила тяжіння була увімкнена як глобальний фактор, що впливає на осадження частинок, їх скупчення та вплив на ефективність подальшого очищення.

Першим етапом моделювання є дослідження процесу руйнування плодів і відокремлення насіння під дією дробильного і зворотного конусів. Схема моделювання наведена на рисунку 2.9.

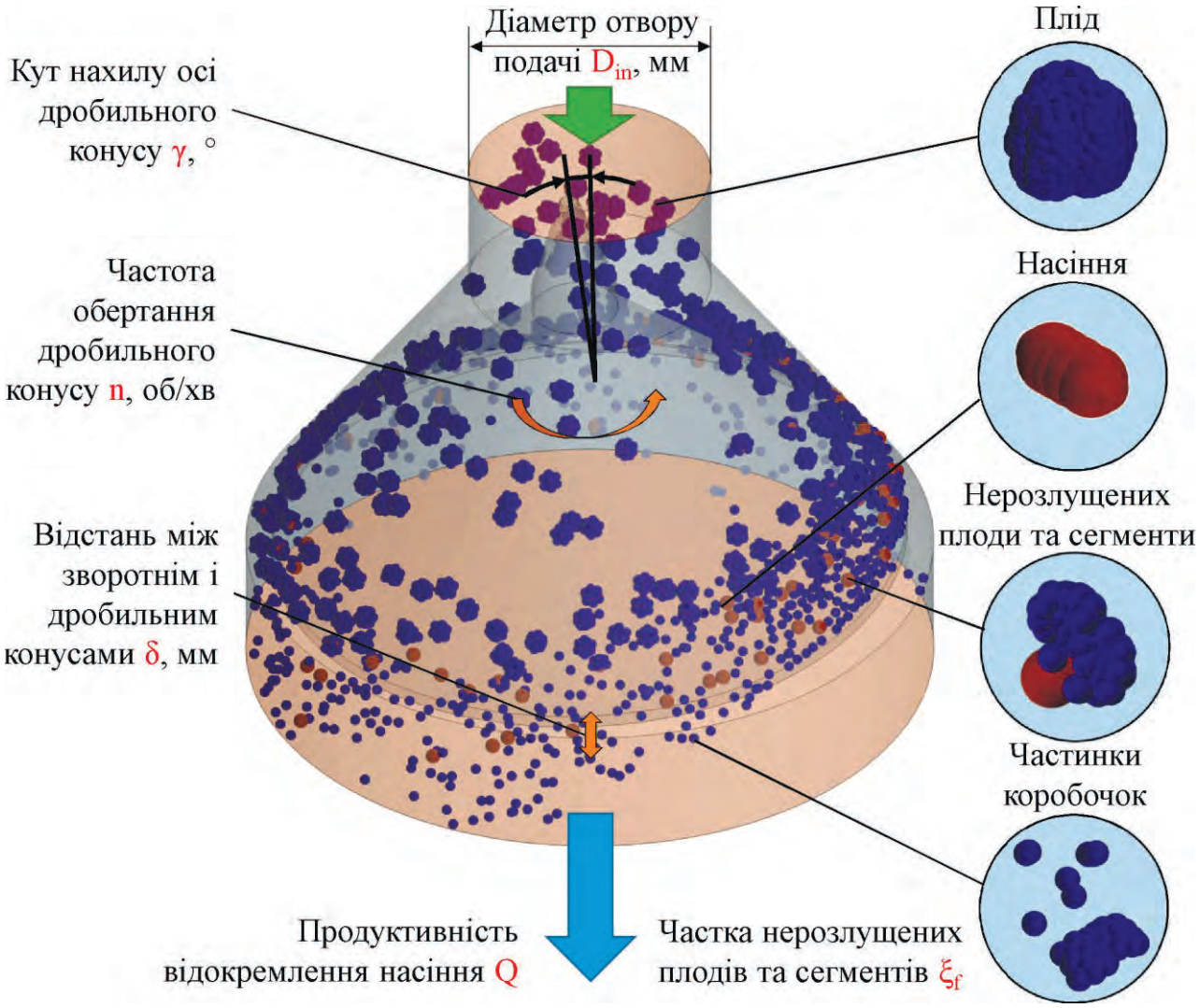


Рисунок 2.9 – Постановка задачі чисельного моделювання процесу руйнування плодів і відокремлення насіння під дією дробильного і зворотного конусів

В якості факторів досліджень обрано: діаметр отвору подачі D_{in}, кут нахилу осі дробильного конусу γ, частота обертання дробильного конусу n, відстань між зворотнім і дробильним конусами δ. Вибір факторів дослідження обґрунтований їх безпосереднім впливом на ефективність процесу руйнування плодів рицини в конічній дробарці.

Діаметр отвору подачі D_{in} визначає об’ємну витрату плодів рицини, що надходить у робочу зону розробленої машини. Зменшення або збільшення цього параметра змінює густину потоку плодів, що впливає на ймовірність зіткнень, затримку частинок у зоні дроблення та рівномірність завантаження.

Кут нахилу осі дробильного конусу γ впливає на траєкторію руху частинок і напрям сили взаємодії між плодом і робочими поверхнями. Від цього кута залежить, наскільки інтенсивно плоди будуть притискатися до дробильної поверхні, а отже – і ефективність руйнування.

Частота обертання дробильного конусу n визначає кінематичну енергію, що передається плодам рицини під час контакту. Вища частота обертання збільшує силу удару та зусилля стиску, але водночас може викликати зростання відцентрових сил, які ускладнюють контакт. Тому цей параметр критично впливає на ступінь руйнування.

Відстань між зворотним і дробильним конусами δ є визначальною для формування зазору, у якому відбувається стискання плодів. Від цього зазору залежить інтенсивність дроблення: при надто малому значенні руйнування може бути надмірним або виникне заклинювання, при надто великому – частинки не руйнуватимуться належним чином.

Таким чином, обрані фактори комплексно охоплюють геометричні, кінематичні та технологічні аспекти роботи дробарки, що дозволяє всебічно дослідити вплив режимів її роботи на ефективність руйнування плодів рицини. Межі і рівні варіювання наведені в таблиці 2.2.

В результаті моделювання отримано сцену візуалізації процесу руйнування плодів рицини і відокремлення насіння і коробочок, яка представлена на рис. 2.10. На рисунку відображено динаміку контакту плодів з робочими поверхнями дробильного і зворотного конусів, де реалізується поетапне руйнування оболонки (коробочки) та вивільнення насіння. Частинки представлені у вигляді елементів моделі дискретних тіл (DEM), з чітким розмежуванням між уламками оболонок (сині субчастинки) і ядрами насіння (червоні субчастинки). Також візуалізовано швидкість руху частинок й положення у просторі. Рисунок дає змогу наочно оцінити ефективність параметрів роботи дробарки, а також характер розподілу продуктів руйнування – що є важливим для подальшої оптимізації конструкції робочих органів і налаштування режимів подрібнення. Тому в якості критерію досліджень обрано частку нерозлущених плодів та сегментів ξ_f.

Таблиця 2.2 – Межі і рівні варіювання факторами чисельного моделювання процесу руйнування плодів і відокремлення насіння під дією дробильного і зворотного конусів

Назва фактору	Відстань між зворотнім і дробильним конусами	Частота обертання дробильного конусу	Діаметр отвору подачі	Кут нахилу осі дробильного конусу
Позначення	δ, мм	n, об/хв	D_{in}, мм	γ, °
Кодоване позначення	x_1	x_2	x_4	x_5
– 1	0	200	60	0
0	10	300	100	2
+ 1	20	400	140	4
Δ	10	100	40	2

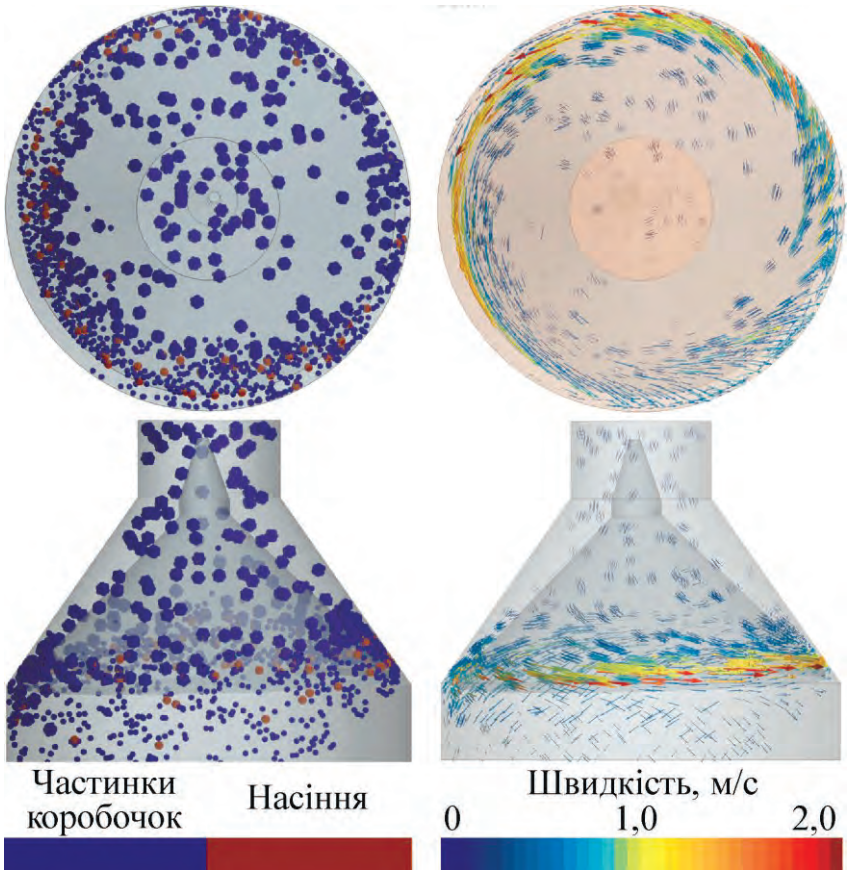


Рисунок 2.10 – Візуалізації процесу руйнування плодів рицини і відокремлення насіння і коробочок

На рисунку 2.11 представлено сцену візуалізації, що ілюструє розподіл сили стиску та швидкості переміщення плодів і частинок коробочок рицини під час

процесу руйнування. На зображенні чітко видно зони підвищеного стискового навантаження, де плоди зазнають максимального механічного впливу, що призводить до їх руйнування. Водночас показано напрямки і величини швидкості руху окремих частинок, що дозволяє оцінити динаміку їх переміщення в робочій камері дробарки. Така візуалізація допомагає зрозуміти взаємозв'язок між механічними зусиллями та кінематикою процесу, що є важливим для аналізу ефективності дроблення та подальшого вдосконалення конструкції і режимів роботи обладнання.

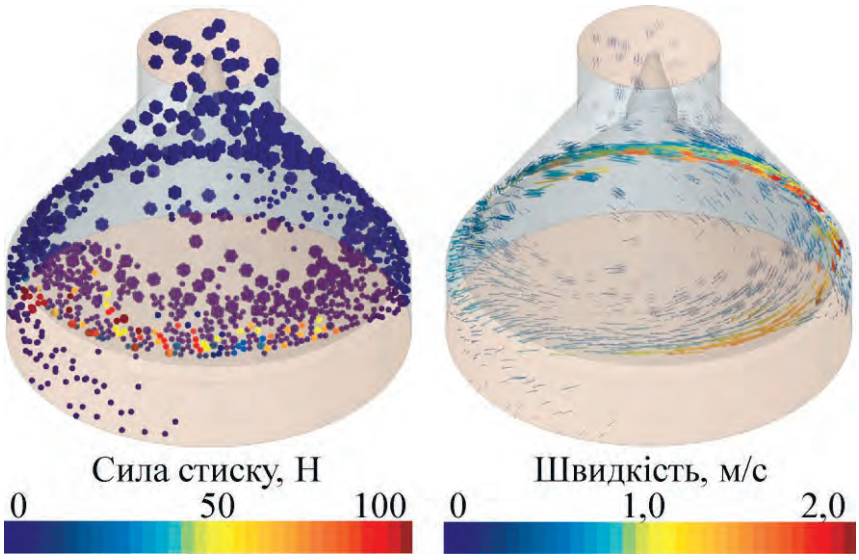


Рисунок 2.11 – Візуалізації розподілу сили стиску та швидкості переміщення плодів і частинок коробочок рицини під час процесу їх руйнування

У результаті чисельного моделювання отримано дані, узагальнені в таблиці додатку Б. На основі методики статистичної обробки, викладеної в розділі 3.5, із використанням програмного пакету Wolfram Cloud побудовано рівняння регресії другого порядку, що описують залежності досліджуваних критеріїв від впливових факторів (додаток Б).

Рівняння регресії для продуктивності відокремлення насінин Q (кг/год) у закодованому вигляді подано у такій формі:

$$Q = 155{,}352 + 50{,}4111\, x_1 - 6{,}02222\, x_1^2 + 2{,}66111\, x_2 + 9{,}17222\, x_1 x_2 - \qquad (2.27)$$

$$– 42{,}7722\ x_2^2 + 18{,}8519\ x_4 + 7{,}61111\ x_1\ x_4 + 5{,}58333\ x_2\ x_4 +$$
$$+ 3{,}62222\ x_4^2 + 7{,}5037\ x_5 – 0{,}0527778\ x_1\ x_5 – 0{,}0444444\ x_2\ x_5 –$$
$$– \ 0{,}191667\ x_4\ x_5 – 2{,}93333\ x_5^2,$$

де x_1 – закодоване значення відстані між зворотнім і дробильним конусами δ; x_2 – закодоване значення частоти обертання дробильного конусу n; x_4 – закодоване значення діаметра отвору подачі D_{in}; x_5 – закодоване значення кута нахилу осі дробильного конусу γ.

Статистичний аналіз рівняння (2.27) подано в таблиці 2.3. Порівнявши обчислені значення t-статистики з табличним критичним значенням t(0,05;30) = 2,04, були вилучені незначущі коефіцієнти регресії. Після цього рівняння (2.27) було розкодоване, в результаті чого отримано остаточну залежність продуктивності відокремлення насінин Q від досліджуваних факторів, що зображено на рис. 2.12:

$$Q = – 240{,}523 – 0{,}59051\ D_{in} + 0{,}002264\ D_{in}^2 + 2{,}36164\ n + \ 0{,}0013958\ D_{in}\ n –$$
$$– 0{,}00427722\ n^2 + 6{,}68519\ \gamma – 0{,}733333\ \gamma^2 + 1{,}59111\ \delta + 0{,}0190278\ D_{in}\ \delta + \qquad (2.28)$$
$$+ 0{,}00917222\ n\ \delta – 0{,}0602222\ \delta^2.$$

Залежність (2.28) має нелінійний характер і включає як лінійні, так і квадратичні та комбіновані (взаємодійні) члени, що відображає складну фізико-механічну природу процесу руйнування плодів і відокремлення насіння.

Фізично, зменшення або надмірне збільшення діаметра отвору подачі D_{in} може впливати на рівномірність надходження плодів у робочу зону, що, у свою чергу, позначається на стабільності процесу та рівні завантаження дробильного механізму. У рівнянні лінійний коефіцієнт при D_{in} має від’ємне значення, що вказує на загальну тенденцію до зменшення продуктивності при його збільшенні, однак квадратичний додатний член свідчить про наявність точки перегину, тобто певного оптимального значення, при якому негативний вплив згладжується.

Частота обертання дробильного конусу n позитивно впливає на інтенсивність руйнування плодів, оскільки збільшується кількість контактів і зростає динамічний тиск, проте надмірне підвищення n призводить до зниження продуктивності через перевантаження системи, підвищення інерційних втрат або виникнення хаотичних

рухів у робочій зоні. Це підтверджується наявністю від’ємного квадратичного члена, що обмежує зростання ефективності при надмірно високих обертах.

Таблиця 2.3 – Оцінка статистичної значущості коефіцієнтів регресії (2.27)

Позначення	Оцінка	Стандартна похибка	t-статистика	p-значення
b_{00}	155,352	1,79021	86,7786	$9{,}48452\cdot10^{-70}$
b_{10}	50,4111	0,73085	68,976	$3{,}06798\cdot10^{-63}$
b_{20}	2,66111	0,73085	3,64112	0,000534424
b_{40}	18,8519	0,73085	25,7944	$3{,}46097\cdot10^{-36}$
b_{50}	7,5037	0,73085	10,2671	$2{,}59222\cdot10^{-15}$
b_{12}	9,17222	0,895105	10,2471	$2{,}80753\cdot10^{-15}$
b_{14}	7,61111	0,895105	8,50304	$3{,}33696\cdot10^{-12}$
b_{15}	– 0,0527778	0,895105	– 0,0589627	0,95316
b_{24}	5,58333	0,895105	6,23763	$3{,}5803\cdot10^{-8}$
b_{25}	– 0,0444444	0,895105	– 0,0496528	0,960549
b_{45}	– 0,191667	0,895105	– 0,214128	0,831108
b_{11}	– 6,02222	1,26587	– 4,75738	0,000011074
b_{22}	– 42,7722	1,26587	– 33,7888	$2{,}20213\cdot10^{-43}$
b_{44}	3,62222	1,26587	2,86145	0,00564341
b_{55}	– 2,93333	1,26587	– 2,31725	0,0236016

Позначення	DF	SS	MS	F-статистика
Модель	15	$1{,}43112\cdot10^{6}$	95408	3309
Похибка	66	1903,68	28,8436	1,95

Кут нахилу осі дробильного конуса γ визначає геометрію розміщення плодів у зоні стиску. Його позитивний вплив пояснюється покращенням умов подачі й стиснення плодів під дією сили тяжіння та осьових зусиль. Однак при надто великому куті можливе "випадіння" плодів із зони ефективної дії, що відображається негативним квадратичним коефіцієнтом.

Відстань між дробильним і зворотним конусами δ безпосередньо впливає на ступінь стиснення плоду. При збільшенні відстані зменшується контактний тиск, що зменшує ефективність руйнування оболонки плоду, але надто мала відстань призводить до надмірного стискання, що може призвести до руйнування не лише

оболонки, а й самого насіння. Наявність у рівнянні як позитивного лінійного, так і негативного квадратичного члена вказує на необхідність точного регулювання цього параметра.

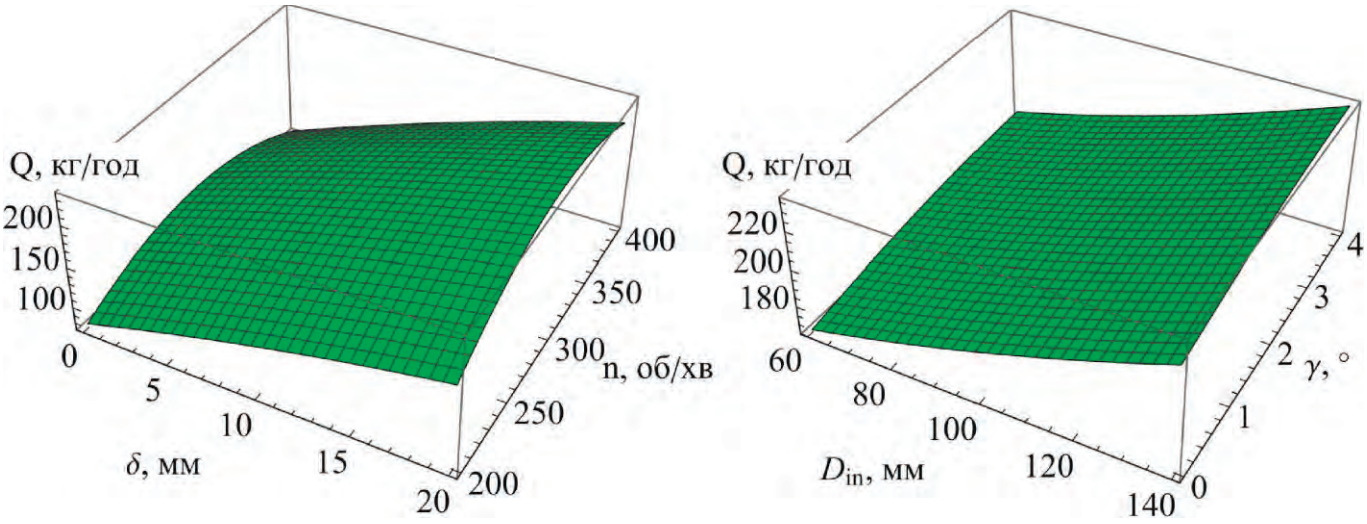


Рисунок 2.12 – Залежність продуктивності відокремлення насінин рицини Q від відстані між зворотнім і дробильним конусами δ, частоти обертання дробильного конусу n, діаметра отвору подачі D_{in} і кута нахилу осі дробильного конусу γ

Для досягнення максимального значення Q = 236 кг/год необхідно узгодити параметри (δ = 20 мм, n = 320 об/хв, D_{in} = 140 мм, γ = 4 °) так, щоб забезпечити ефективне, але не надмірне стиснення плодів, рівномірну подачу сировини, оптимальну швидкість обертання та сприятливу геометрію розміщення робочих органів.

Рівняння регресії для частки нерозлущених плодів (сегментів) ξ_f у закодованому вигляді має наступну форму:

$$\begin{aligned}\xi_f = {} & 0{,}166111 + 0{,}0962407\, x_1 - 0{,}0378704\, x_1^2 + 0{,}023333\, x_2 + 0{,}009778\, x_1 x_2 + \\ & + 0{,}0230741\, x_2^2 + 0{,}0359815\, x_4 - 0{,}000972222\, x_1 x_4 + 0{,}000833333\, x_2 x_4 + \\ & + 0{,}0231296\, x_4^2 - 0{,}0245185\, x_5 - 0{,}00622222\, x_1 x_5 - 0{,}00122222\, x_2 x_5 - \\ & - 0{,}000388889\, x_4 x_5 + 0{,}0187407\, x_5^2.\end{aligned} \quad (2.29)$$

Результати статистичної обробки рівняння (2.29) подано в таблиці 2.4. Порівняння розрахованих значень t-критерію з табличним критичним значенням

t(0,05;30) = 2,04 дозволило виявити регресійні коефіцієнти, що не мають істотного впливу на результат. Після цього було виконано зворотне (натуралізоване) перетворення рівняння (2.29), у результаті якого отримано остаточну залежність частки нерозлущених плодів ξ_f від реальних значень факторів:

$$\xi_f = 0{,}290644 - 0{,}00199167\, D_{in} + 0{,}000014456\, D_{in}^2 - 0{,}00124889\, n + \\ + 2{,}30741\cdot 10^{-6}\, n^2 - 0{,}0278889\, \gamma + 0{,}0046852\, \gamma^2 + 0{,}014887\, \delta + 9{,}778\cdot 10^{-6}\, n\, \delta - \\ - 0{,}000311111\, \gamma\, \delta - 0{,}000378704\, \delta^2. \quad (2.30)$$

Графічне зображення залежності за рівнянням (2.30) наведено на рисунку 2.13.

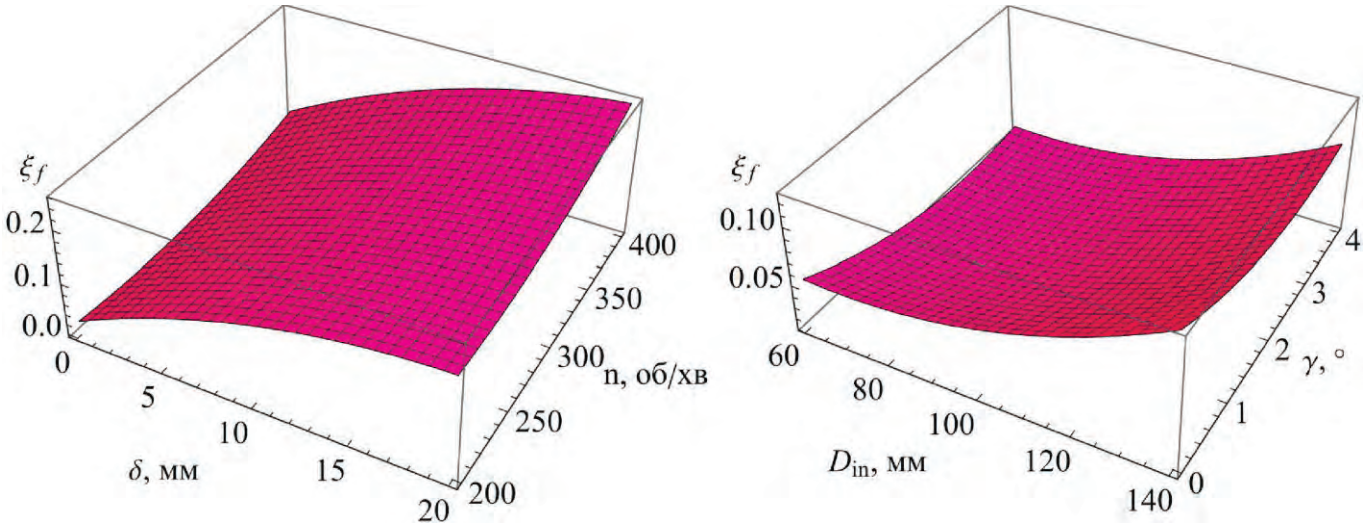


Рисунок 2.13 – Залежність частки нерозлущених плодів (сегментів) ξ_f від відстані між зворотнім і дробильним конусами δ, частоти обертання дробильного конусу n, діаметра отвору подачі D_{in} і кута нахилу осі дробильного конусу γ

Форма рівняння (2.30) свідчить про складну нелінійну взаємодію між цими параметрами, що відображає фізичну суть процесу механічного руйнування плодів.

Зменшення частки нерозлущених плодів із ростом діаметра отвору подачі D_{in} пояснюється покращенням умов подавання сировини в зону стискання. Проте надмірне збільшення діаметра може призвести до зниження тиску в зоні руйнування, через що частина плодів залишається нерозлущеною – це підтверджується зміною знаку квадратичного члена. Таким чином, існує оптимальне

значення D_{in} = 69 мм, за якого забезпечується рівномірна подача та ефективне стискання.

Таблиця 2.4 – Оцінка статистичної значущості коефіцієнтів регресії (2.29)

Позначення	Оцінка	Стандартна похибка	t-статистика	p-значення
b_{00}	0,166111	0,0016905	98,2615	$2{,}76673 \cdot 10^{-73}$
b_{10}	0,0962407	0,000690144	139,45	$2{,}85727 \cdot 10^{-83}$
b_{20}	0,0233333	0,000690144	33,8094	$2{,}12006 \cdot 10^{-43}$
b_{40}	0,0359815	0,000690144	52,1362	$2{,}32004 \cdot 10^{-55}$
b_{50}	– 0,0245185	0,000690144	– 35,5267	$9{,}5303 \cdot 10^{-45}$
b_{12}	0,00977778	0,00084525	11,5679	$1{,}57979 \cdot 10^{-17}$
b_{14}	– 0,000972222	0,00084525	– 1,15022	0,254205
b_{15}	– 0,00622222	0,00084525	– 7,3614	$3{,}67539 \cdot 10^{-10}$
b_{24}	0,000833333	0,00084525	0,985901	0,327782
b_{25}	– 0,00122222	0,00084525	– 1,44599	0,152913
b_{45}	– 0,000388889	0,00084525	– 0,460087	0,646966
b_{11}	– 0,0378704	0,00119536	– 31,681	$1{,}21171 \cdot 10^{-41}$
b_{22}	0,0230741	0,00119536	19,303	$7{,}60937 \cdot 10^{-29}$
b_{44}	0,0231296	0,00119536	19,3494	$6{,}64689 \cdot 10^{-29}$
b_{55}	0,0187407	0,00119536	15,6779	$6{,}13395 \cdot 10^{-24}$

Позначення	DF	SS	MS	F-статистика
Модель	15	3,43536	0,229024	8904
Похибка	66	0,00169753	0,0000257201	1,95

Частота обертання дробильного конусу n впливає на інтенсивність контакту плодів з робочими органами. При збільшенні швидкості зростає кінетична енергія взаємодії, що сприяє кращому руйнуванню оболонок плодів. Проте при надто високих обертах (n > 271 об/хв) може зменшитись час контакту між плодами й робочою поверхнею, або виникнути ефект "розкидання", що знижує якість розлущення. Це відображено наявністю позитивного квадратичного члена, який обмежує позитивний вплив надмірного зростання частоти.

Кут нахилу осі дробильного конусу γ визначає геометричну орієнтацію зони подрібнення відносно сили тяжіння та напрямку подачі. При збільшенні кута

поліпшується обтікання та розташування плодів у робочій зоні, що сприяє кращому зминанню. Однак надто великий кут може змінити напрям зусиль таким чином, що плоди уникатимуть максимального навантаження або вислизатимуть, не руйнуючись. Тому залежність має нелінійний характер із оптимумом ($\gamma = 2{,}9°$).

Відстань між дробильним і зворотним конусами напряму визначає ступінь стиснення. Зі зростанням δ тиск між поверхнями зменшується, і відповідно зменшується ефективність руйнування оболонок плодів. Але при надто малій відстані зростає ризик блокування плодів або пошкодження самого насіння. Це підтверджується наявністю квадратичного члена з негативним коефіцієнтом, що описує наявність мінімуму частки нерозлущених плодів за оптимального значення δ.

Взаємодії членів рівняння (наприклад, між n та δ, або між γ та δ) свідчать про те, що ефективність процесу визначається не лише окремими параметрами, а й їх поєднанням. Зокрема, оптимальне поєднання частоти обертання та відстані дозволяє забезпечити стійкий контакт і контрольований ступінь стискання, тоді як невдалі комбінації можуть погіршити умови подрібнення.

Для оптимізації конструктивно-технологічних параметрів машини для очищення насіння рицини скористаємося умовою мінімізації частки нерозлущених плодів (сегментів) при високій продуктивності відокремлення насінин:

$$\begin{cases} Q\left(\delta, n, D_{in}, \gamma\right) \to \max, \\ \xi_f\left(\delta, n, D_{in}, \gamma\right) \to \min. \end{cases} \tag{2.31}$$

За допомогою Wolfram Cloud і методу мінімізації мультиплікативної цільової функції, сформованої шляхом скалярного ранжування, реалізовано ефективний підхід до багатокритеріальної оптимізації. Він полягає у зведенні задачі з кількома критеріями до однокритеріальної через побудову агрегованої функції у вигляді добутку нормалізованих значень кожного критерію з урахуванням їх вагомості. Такий підхід дозволяє одночасно мінімізувати, наприклад, енерговитрати й частку нерозлущених плодів та максимізувати вміст ліквідного насіння. Загальний вигляд функції має форму:

$$K = \frac{Q(\delta, n, D_{in}, \gamma) - Q^{min}}{Q^{max} - Q^{min}} \frac{\xi_f^{max} - \xi_f(\delta, n, D_{in}, \gamma)}{\xi_f^{max} - \xi_f^{min}} \rightarrow max. \quad (2.32)$$

Вирішуючи рівняння (2.32) спільно з (2.28) і (2.30) отримані раціональні значення конструктивно-технологічних параметрів машини для очищення насіння рицини: δ = 8,6 мм; n = 291 об/хв; D_{in} = 98 мм; γ = 3,6° → Q = 150,7 кг/год; ξ_f = 0,141.

Другим етапом моделювання є процес очищення насіння рицини від нерозлущених плодів, залишків оболонок та частинок коробочок, який здійснюється в системі аеродинамічного очищення. Дана система складається з пневмосепаруючого каналу з установленим у ньому решетом, а також циклона для виділення легких домішок з повітряного потоку (рис. 2.14).

Пневмосепаруючий канал виконує функцію розділення матеріалу за аеродинамічними властивостями. Потік повітря, що проходить через канал, захоплює легші фракції – оболонки, частинки коробочок, пилові включення, а важчі насінини рицини та частина нерозлущених плодів осідають. Для забезпечення оптимальних умов розділення розміри каналу вибрано 220 × 220 мм, що відповідає рекомендаціям попередніх експериментальних і теоретичних досліджень [164, 165, 166, 167]. Такі габарити забезпечують достатню площу перерізу для стабілізації повітряного потоку і ефективного сепарування суміші за крупністю та питомою вагою.

Циклон призначений для уловлювання з каналу дрібних частинок та пилу. Його конструктивні параметри (висота, діаметр, співвідношення між вхідним і вихідним отворами) вибрано з урахуванням рекомендацій попередніх досліджень [168, 169, 170, 24], що дозволяє забезпечити високий ступінь очищення повітряного потоку при мінімальних втрат насіння.

Решето в пневмосепаруючому каналі виконує додаткову функцію поділу за розмірами. Використовується прутковий тип решета, що забезпечує ефективне пропускання насіння і затримання більших фрагментів коробочок. Розмір щілини між прутками вибрано 12 мм, що є меншим за розміри плодів і більшим за розміри насінин рицини (розділ 4.1). Це дозволяє мінімізувати втрати насіння при одночасному ефективному видаленні більших за розміром домішок.

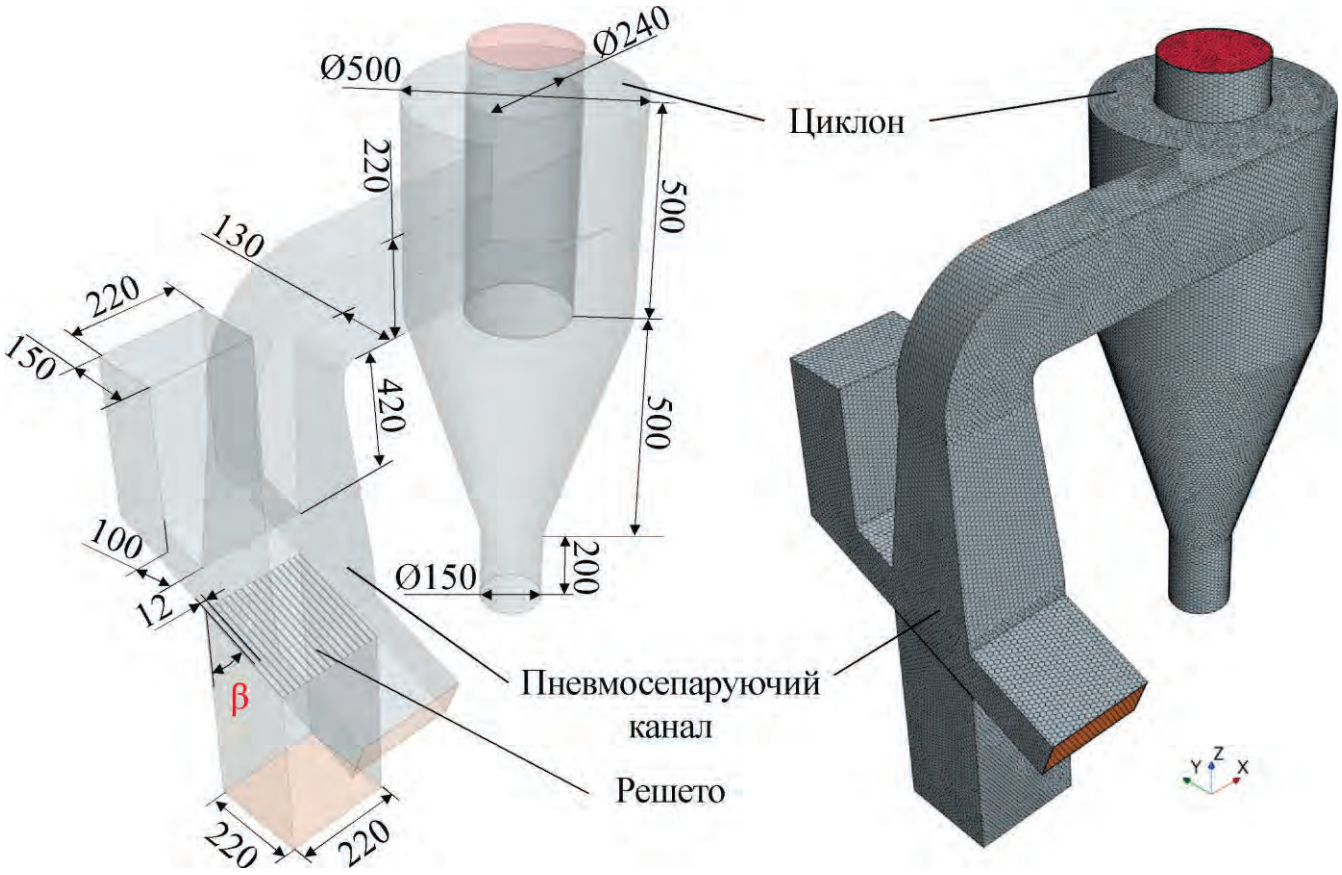


Рисунок 2.14 – Геометричні розміри робочих органів
системи аеродинамічного очищення

В рамках проведення моделювання та подальших експериментальних досліджень основним конструктивним фактором, що варіюється, є кут встановлення решета β. Зміна кута в межах від 10° до 40° (згідно з кутом природного укосу, визначеним у розділі 4.1 для всіх компонентів), дозволяє регулювати ефективність сепарації та забезпечує оптимальний режим роботи системи аеродинамічного очищення, впливаючи на напрям і швидкість руху частинок у повітряному потоці.

Схема моделювання наведена на рис. 2.15. Вхідний матеріал представлений сумішшю нерозлущених плодів та сегментів, насіння і частинок коробочок.

За результатами першого етапу моделювання частка нерозлущених плодів та сегментів становить $\xi_f = 0{,}14$, частка насіння – $\xi_s = 0{,}61$, а частка частинок коробочок – $\xi_p = 0{,}25$. Подача (продуктивність відокремлення насіння) Q є одним із факторів дослідження. Згідно з першим етапом досліджень, значення Q знаходиться в межах

від 30 кг/год до 230 кг/год. Третім фактором дослідження є швидкість повітря в пневмосепаруючому каналі V, яка відповідно до розділу 4.1 варіюється в межах від 2 м/с до 6 м/с.

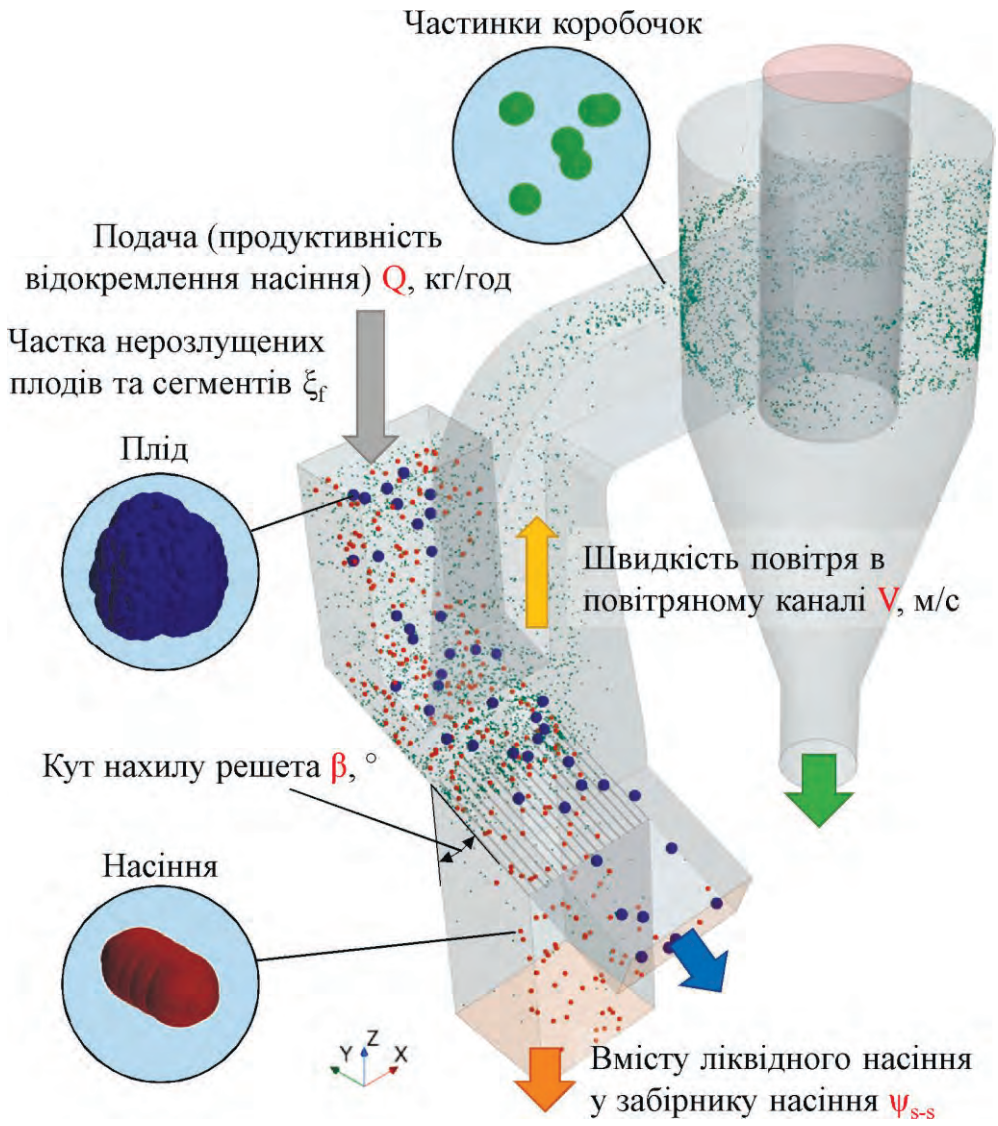


Рисунок 2.15 – Постановка задачі чисельного моделювання процесу очищення насіння від плодів та частинок під дією повітряного потоку

Рівні та межі варіювання факторами другого етапу чисельного моделювання наведені в таблиці 2.5.

У результаті чисельного моделювання отримано візуалізацію процесу переміщення компонентів суміші в системі аеродинамічного очищення (рис. 2.16).

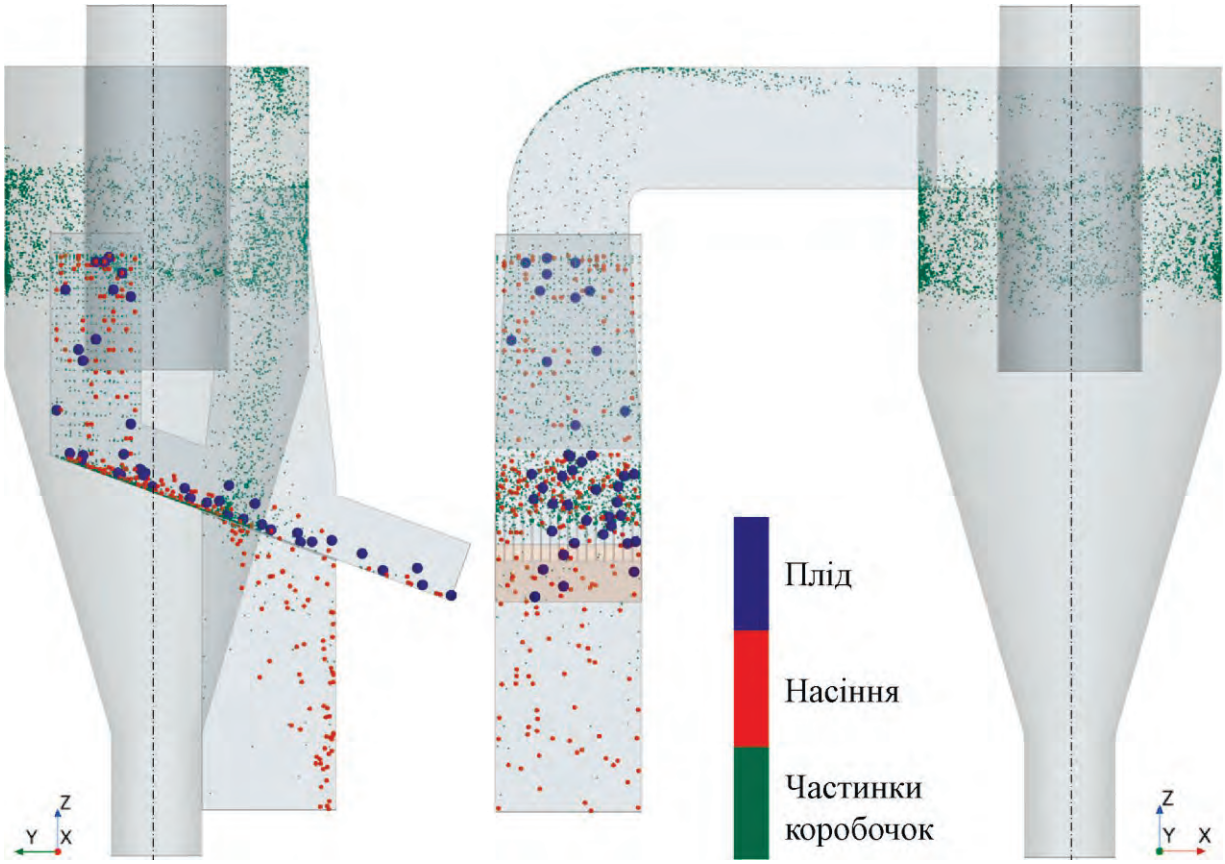


Рисунок 2.16 – Візуалізації процесу очищення насіння від плодів та частинок під дією повітряного потоку

На основі побудованої моделі вдалося простежити траєкторії руху насіння, нерозлущених плодів та частинок коробочок у повітряному потоці. Візуалізація дозволяє оцінити динаміку взаємодії компонентів з повітряним середовищем, характер осідання важчих фракцій і винесення легких домішок із зони сепарації. Це дає можливість визначити оптимальні параметри швидкості повітря та положення решета для підвищення ефективності очищення.

Критерієм дослідження є вміст ліквідного насіння у забірнику насіння $\psi_{s\text{-}s}$, який визначався в середовищі Simcenter Star-CCM+ автоматично кожні 0,1 с. Загальна тривалість моделювання становила 300 с.

Крім того, в середовищі Simcenter Star-CCM+ побудовано лінії току (рис. 2.17, а), які відображають напрямок та характер руху повітряного потоку в системі аеродинамічного очищення. Це дозволяє візуалізувати зони стабільного

потоку, рециркуляції та турбулізації, що мають суттєвий вплив на траєкторії руху частинок суміші. Додатково сформовано векторні поля швидкості повітряного потоку (рис. 2.17, б), які дають можливість проаналізувати розподіл швидкісних компонент у різних зонах робочого об'єму. Отримані візуалізації дозволяють детально оцінити аеродинамічну картину всередині робочої зони та обґрунтувати раціональні режими роботи системи очищення для забезпечення максимальної ефективності виділення ліквідного насіння.

Таблиця 2.5 – Межі і рівні варіювання факторами чисельного моделювання процесу очищення насіння від плодів та частинок під дією повітряного потоку

Назва фактору	Подача (продуктивність відокремлення насіння)	Кут нахилу решета	Швидкість повітряного потоку
Позначення	Q, кг/год	β, °	V, м/с
Кодоване позначення	x_6	x_7	x_3
– 1	30	10	2
0	130	25	4
+ 1	230	40	6
Δ	100	15	2

У закодованому форматі рівняння регресії для визначення $\psi_{s\text{-}s}$ (вмісту ліквідного насіння у забірнику) подається у такому вигляді:

$$\psi_{s\text{-}s} = 0{,}944963 + 0{,}007\, x_3 + 0{,}00111111\, x_3^2 + 0{,}0192778\, x_6 + \\ + 0{,}00116667\, x_3 x_6 - 0{,}0477222\, x_6^2 - 0{,}0272222\, x_7 + \\ + 0{,}000666667\, x_3 x_7 - 0{,}000833333\, x_6 x_7 - 0{,}0438889\, x_7^2. \quad (2.33)$$

У таблиці 2.6 наведено результати статистичної перевірки рівняння (2.33). Порівняння отриманих t-статистик із критичним значенням t(0,05;27) = 2,052 дозволило визначити коефіцієнти регресії, вплив яких на модель не є статистично значущою. Після зворотного (натуралізованого) перетворення рівняння (2.33) отримано фінальний вираз, який описує залежність вмісту ліквідного насіння у забірнику ψs-s від досліджуваних факторів:

$$\psi_{s\text{-}s} = 0{,}593978 + 0{,}00319717\, Q - 9{,}73923 \cdot 10^{-6}\, Q^2 + 0{,}0035\, V + \quad (2.34)$$

$$+ 0{,}00793827\ \beta - 0{,}000195062\ \beta^2.$$

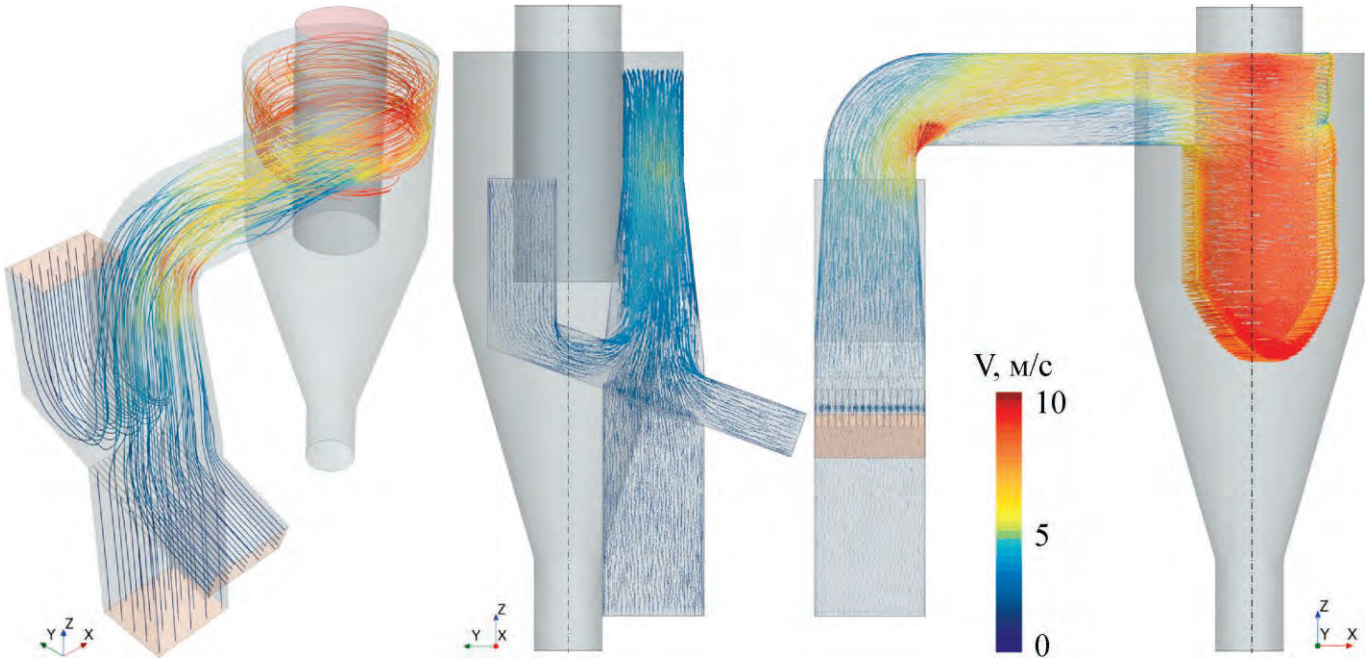


Рисунок 2.17 – Лінії току і векторні поля швидкості повітряного потоку в системі аеродинамічного очищення

Графічне відображення залежності, описаної рівнянням (2.34), наведено на рисунку 2.18.

Аналіз отриманої моделі дозволяє визначити характер впливу кожного із факторів на ефективність процесу відокремлення ліквідного насіння. Позитивний коефіцієнт при лінійному члені подачі Q свідчить про те, що збільшення продуктивності відокремлення сприяє підвищенню вмісту ліквідного насіння у забірнику. Однак наявність квадратичного члена з від'ємним коефіцієнтом вказує на існування оптимального значення подачі, при перевищенні якого ефективність процесу починає знижуватись. Це зумовлено фізичними обмеженнями: при надмірній подачі на решеті утворюється щільний шар матеріалу, що ускладнює відокремлення ліквідного насіння і призводить до його втрат разом з домішками. Вплив швидкості повітряного потоку V має виключно позитивний характер, оскільки збільшення швидкості повітря сприяє кращому видаленню легких домішок

та пустих оболонок, забезпечуючи стабільні умови для просіювання ліквідного насіння через решето.

Таблиця 2.17 – Оцінка статистичної значущості коефіцієнтів регресії (2.33)

Позначення	Оцінка	Стандартна похибка	t-статистика	p-значення
b_{00}	0,944963	0,0035935	262,964	$3{,}98145\cdot10^{-32}$
b_{60}	0,0192778	0,00166347	11,5889	$1{,}7119\cdot10^{-9}$
b_{70}	– 0,0272222	0,00166347	– 16,3647	$7{,}71653\cdot10^{-12}$
b_{30}	0,007	0,00166347	4,20808	0,00059123
b_{67}	– 0,000833333	0,00203732	– 0,409033	0,687622
b_{63}	0,00116667	0,00203732	0,572647	0,57438
b_{73}	0,000666667	0,00203732	0,327227	0,747491
b_{66}	– 0,0477222	0,00288121	– 16,5632	$6{,}35889\cdot10^{-12}$
b_{77}	– 0,0438889	0,00288121	– 15,2328	$2{,}42429\cdot10^{-11}$
b_{33}	0,00111111	0,00288121	0,38564	0,704546

Позначення	DF	SS	MS	F-статистика
Модель	10	21,1755	2,11755	42524
Похибка	17	0,000846741	0,0000498083	2,49

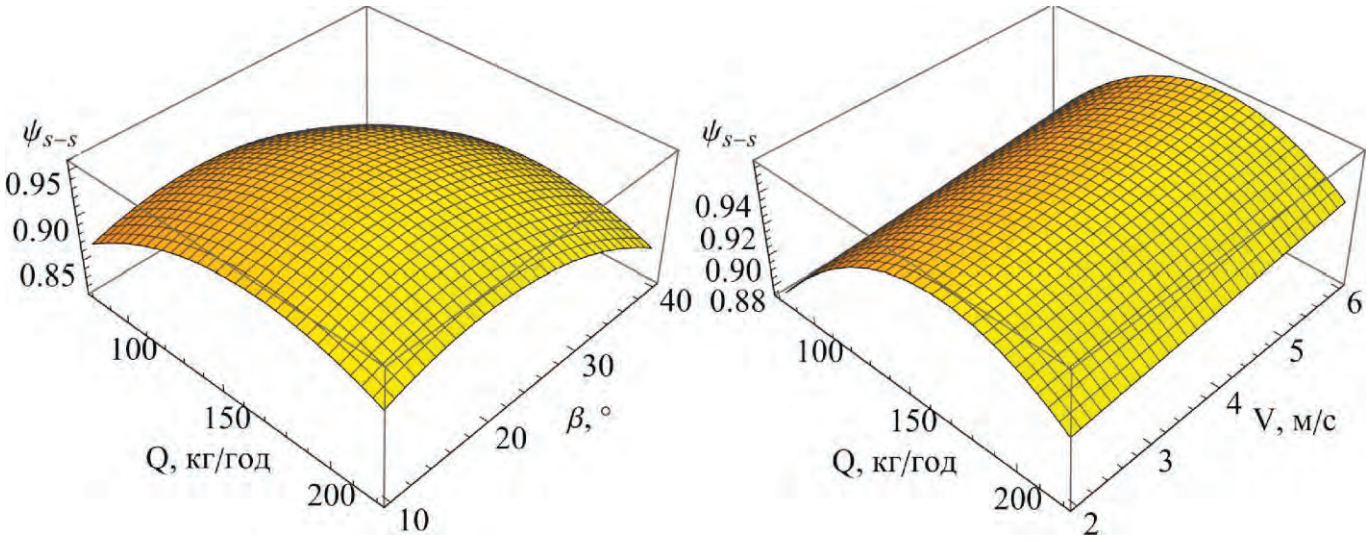


Рисунок 2.18 – Залежність вмісту ліквідного насіння у забірнику насіння $\psi_{s\text{-}s}$ від подачі (продуктивність відокремлення насіння) Q, кута нахилу решета β і швидкості повітряного потоку V

Водночас вплив кута нахилу решета β проявляється як у лінійній, так і у квадратичній формі. Початкове збільшення кута нахилу покращує процес відокремлення завдяки прискоренню переміщення матеріалу і зменшенню часу перебування домішок на решеті. Однак при надмірних значеннях кута ефективність знижується, оскільки ліквідне насіння не встигає відокремитися і потрапляє до відходів. Це відображено від'ємним коефіцієнтом при квадраті кута нахилу. Таким чином, модель враховує нелінійний характер взаємозв'язків між факторами та результативною ознакою, що відповідає фізичній суті процесу.

Отримане рівняння дозволяє визначити оптимальні параметри роботи машини для забезпечення максимального вмісту ліквідного насіння у забірнику: $\psi_{s\text{-}s} = 0{,}956 \rightarrow Q = 150{,}7$ кг/год, $\beta = 20{,}3$ °, $V = 6$ м/с.

2.7 Висновки до розділу

1. Запропонована конструкція машини для очищення насіння рицини дає змогу забезпечити комплексну післяжнивну переробку плодів рицини шляхом ефективного розлущування коробочок, відокремлення насіння та високоякісного очищення отриманого вороху від легких домішок, пилу та частинок коробочок. Завдяки поєднанню механічного подрібнення з системою аеродинамічного очищення досягається підвищення якості продукції та зменшення втрат насіння. Автоматизоване регулювання положення зворотного конусу за допомогою мотор-редуктора підвищує точність налаштувань і стабільність технологічного процесу. Додаткове оснащення машини блоком керування забезпечує автоматизацію окремих функціональних вузлів, поліпшує умови експлуатації, підвищує надійність роботи та зменшує вплив людського фактора під час роботи машини.

2. Для глибшого розуміння процесів руйнування плодів рицини і переміщення компонентів отриманої суміші доцільно застосувати метод дискретних елементів (DEM) у Simcenter Star-CCM+. DEM дозволяє моделювати рух і взаємодію частинок без припущень про континуум, відтворюючи відповідні мікроскопічні механізми. Плоди і насіння рицини моделювались, як скупчення сферичних частинок, рух яких

розраховується за рівняннями Ньютона з урахуванням контактних сил і моментів, описаних моделями Герца-Міндліна, обертального тертя з постійним напрямком моменту (CDT) та спрощеною моделлю когезії Джонсона-Кендалла-Робертса (SJKR).

3. Чисельне моделювання процесу руйнування плодів і насіння рицини під дією стискаючого навантаження, виконане на основі схеми (рис. 2.4) з урахуванням фізико-механічних і реологічних властивостей біоматеріалу, дозволило детально проаналізувати етапи деформації та руйнування цих об’єктів. Встановлено, що руйнування має багатофазну природу і включає три основні стадії: пружну деформацію, втрату структурної цілісності (з утворенням тріщин і фрагментацією) та ущільнення залишків. Для плодів рицини характерне поступове зростання сили до пікового значення, плато та різке зменшення опору після руйнування, тоді як насіння демонструє різкий спад сили після досягнення критичного навантаження з подальшим її відновленням через ущільнення залишків. Залежності сили стиску від часу, отримані в результаті чисельного моделювання (рис. 2.5–2.6), повністю узгоджуються з даними лабораторних випробувань (рис. 4.6–4.7), що підтверджує достовірність моделі та обґрунтовує її застосування для подальшого оптимізаційного аналізу й проєктування конструктивно-технологічних параметрів машин для очищення насіння рицини.

4. Створена математична модель (2.10)–(2.26), з використанням якої обґрунтовано розміри робочої зони машини для очищення насіння рицини: діаметри і висоти дробильного та зворотного конусів (480, 520 і 220–240 мм відповідно), початковий зазор (20 мм), амплітуду ходу (10–15 мм) та кут нахилу (0–4°), які забезпечують ефективне багатоетапне стиснення плодів рицини з довжиною до 18 мм без пошкодження насіння. При цьому максимальний тиск формується у зоні мінімального зазору, а мінімальний – у зоні найбільшого розкриття, що відповідає змінному характеру контакту, проілюстрованому на рис. 2.7.

5. В результаті чисельного моделювання процесу відокремлення насіння рицини отримані залежності продуктивності розробленої машини Q (2.28), частки нерозлущених плодів (сегментів) ξ_f (2.30) від відстані між зворотнім і дробильним конусами δ, частоти обертання дробильного конусу n, діаметра отвору подачі D_{in} і

кута нахилу осі дробильного конусу γ. В результаті чисельного моделювання процесу очищення насіння рицини отримано залежність вмісту ліквідного насіння у забірнику $\psi_{s\text{-}s}$ (2.34) від подачі (продуктивність відокремлення насіння) Q, кута нахилу решета β і швидкості повітряного потоку V. Статистичний аналіз отриманих рівнянь регресії дав змогу оцінити внесок кожного з досліджуваних факторів у формування цільових показників роботи машини, виокремити статистично значущі параметри та побудувати достовірні аналітичні моделі процесу.

6. Використання методу скалярного ранжування з мінімізацією мультиплікативної цільової функції в середовищі Wolfram Cloud дало змогу визначити оптимальні значення факторів (δ = 8,6 мм; n = 291 об/хв; D_{in} = 98 мм; γ = 3,6°; β = 20,3 °; V = 6 м/с), за яких досягається максимальна продуктивність процесу (Q = 150,7 кг/год) при забезпеченні прийнятного рівня якості відокремлення (ξ_f = 0,141) та очищення $\psi_{s\text{-}s}$ = 0,956. Отримані результати підтверджують ефективність запропонованої конструкції машини та доцільність її впровадження у виробничих умовах.

Основні наукові результати розділу опубліковано в працях автора [171, 172, 173, 174, 175].

3 ПРОГРАМА І МЕТОДИКА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ПРОЦЕСУ ОЧИЩЕННЯ НАСІННЯ РИЦИНИ

3.1 Мета і задачі експериментальних досліджень

Метою експерименту є розробка, апробація і дослідження машини для очищення насіння рицини, що дозволить визначити вплив основних конструктивно-технологічних параметрів на продуктивність, якість очищення, енергоспоживання та оптимізувати режими її роботи для підвищення ефективності виробничого процесу.

Задачі експериментальних досліджень:

– визначити основні фізико-механічні властивості плодів рицини, їх сегментів і насіння (геометричні розміри, масу, насипну і дійсну щільність, коефіцієнти тертя, кут природного укосу, швидкість витання) для використання у чисельному моделюванні і налаштуванні технологічного процесу очищення;

– дослідити реологічні властивості плодів і насіння рицини при стисканні, вивчити механічну поведінку та характер деформації для оцінки міцності і впливу на подрібнення;

– встановити залежності продуктивності, споживаної потужності, питомих витрат електроенергії, частки нерозлущених плодів та вмісту ліквідного насіння у залежності від основних параметрів машини: відстані між конусами, частоти обертання дробильного конусу і швидкості повітряного потоку.

– провести статистичний аналіз отриманих даних, визначити значущість факторів, побудувати регресійні моделі для прогнозування результатів роботи машини;

– виконати оптимізацію режимів роботи машини із застосуванням методу скалярного ранжування та мультиплікативної функції з метою знаходження параметрів, що забезпечують максимальну ефективність процесу очищення;

– провести порівняння результатів експериментальних досліджень з результатами чисельного моделювання для підтвердження адекватності моделі та обґрунтування подальшого впровадження машини у виробництво.

3.2 Методика лабораторних досліджень фізико-механічних властивостей плодів рицини та їх складових

Лабораторні дослідженя фізико-механічних властивостей плодів рицини сорту Хортичанка та його складових (сегменти (стулки), насіння, частинки коробочки) проводились в декілька етапів. Всі лабораторні дослідження були проведені при температурі та вологості оточуючого повітря в приміщенні – 20,4±2,1 °С та 53,4±5,2 % і контролювались з використанням гігрометра психрометричного ВІТ-1.

Визначення вологості плодів рицини та їх складових проводились з використанням лабораторного вологоміра Radwag MA 110.R (рис. 3.1), який працює за гравіметричним принципом висушування зразка до постійної маси з автоматичним контролем змін ваги [176, 177]. Перед початком вимірювання вологомір був установлений на горизонтальну поверхню та проведено налаштування його основних параметрів і вибрані відповідні режим сушіння – 105 °С. Час вимірювання встановлювався автоматично до стабілізації маси. Для вимірювання зразки, які відбиралися за методикою [178], рівномірно розподіляли на зважувальній платформі та запускали процес сушіння.



Рисунок 3.1 – Визначення вологості плодів рицини та їх складових з використанням лабораторного вологоміра Radwag MA 110.R

Після завершення аналізу, коли маса стабілізувалась або досягнуто заданого часу, зчитували значення вологості на дисплеї. Дискретність вимірювання вологості складає 0,001%, клас точності згідно ДСТУ EN 45501 [179] – II, дискретність вимірювання маси – 0,1 мг. Повторність вимірювання була триразова.

Визначення геометричних розмірів (довжини, ширини) плодів рицини та їх складових проводиться за допомогою товщиноміра ТР 25-100, а ***маса визначається*** з використанням лабораторних вагів ТВЕ-0.3 (рис. 3.2). Перед початком вимірювання товщиномір ТР 25-100 перевіряють на нульове значення у відкритому стані та калібрують за еталонною пластиною, а лабораторні ваги ТВЕ-0.3 встановлюють на рівну поверхню, калібрують і перевіряють за допомогою контрольної гирі.

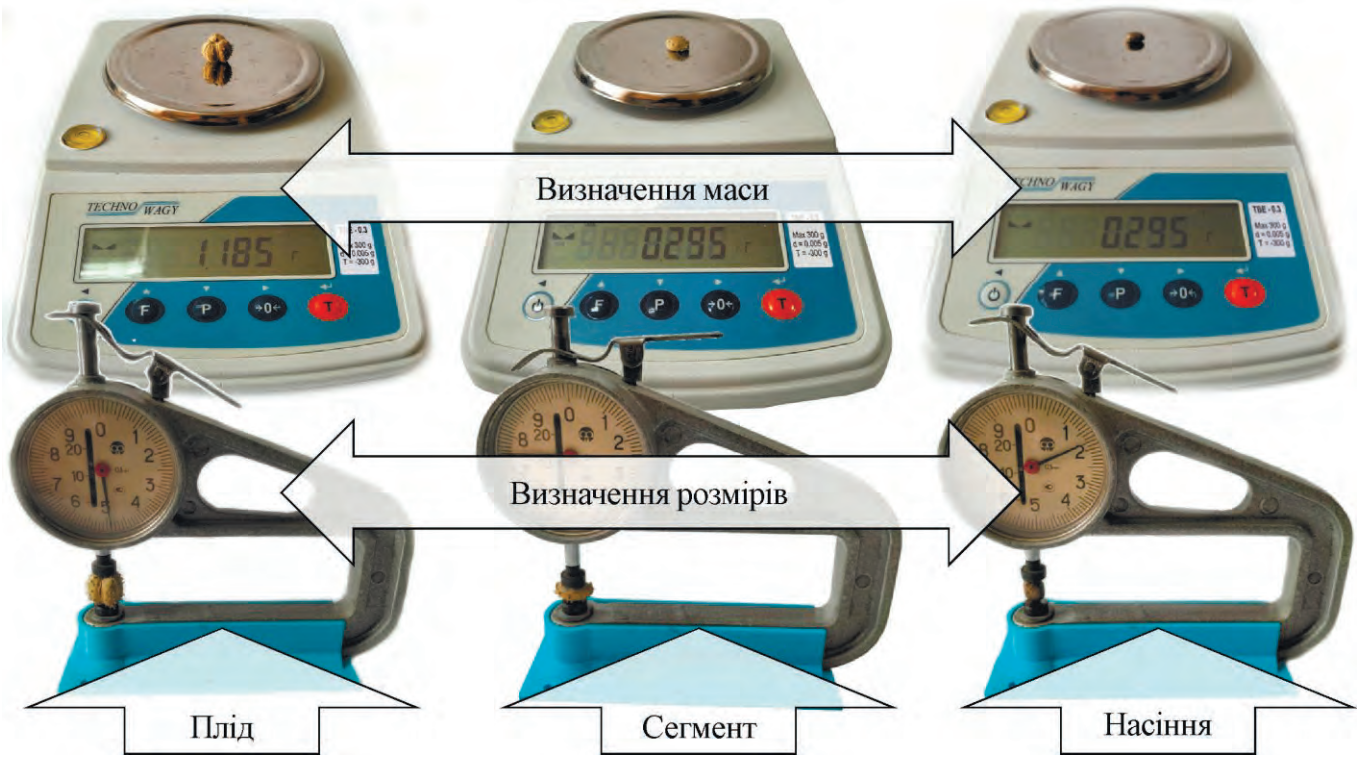


Рисунок 3.2 – Визначення геометричних розмірів (довжини, ширини) і маси плодів і насіння рицини з використанням товщиноміра ТР 25-100 і лабораторних вагів ТВЕ-0.3 відповідно

Для вимірювання геометричних розмірів брали випадковий зразок плоду, сегменту або насіння рицини та за допомогою товщиноміра ТР 25-100 визначали довжину між найбільш віддаленими точками уздовж осі, ширину в найширшому місці перпендикулярно до довжини. Через наявну симетричність плодів і насіння товщина була така сама як і ширина. Повторність вимірювання була триразова. Діапазон вимірювання товщиноміра ТР 25-100 становив 0–25 мм, дискретність – 0,01 мм, похибка – ±0,02 мм. Лабораторні ваги ТВЕ-0.3 мали максимальну межу зважування 300 г, дискретність 0,001 г та похибку ±0,002 г.

Визначення насипної і дійсної щільності плодів рицини та їх складових є важливим параметром при їх транспортуванні та подальшій переробці. Насипна щільність визначається методом заповнення літрової пурки ПХ-2, а дійсна щільність розраховується на основі маси і об'єму витісненої рідини (рис. 3.3, а). Для виконання вимірювань додатково використовували лабораторні ваги ТВЕ-0.3, мірний циліндр об’ємом 150 мл. Визначення насипної щільності розпочинали із зважування порожньої пурки ПХ-2 на лабораторних вагах. Потім пурку заповнювали плодами рицини або його складовими без ущільнення методом вільного засипання, після чого вирівнювали зразки по верхньому краю без натискання. Далі зважували пурку з продуктом. Насипна щільність розраховувалась за формулою:

$$\rho_n = \frac{m_1 - m_0}{V}, \qquad (3.1)$$

де ρ_n – насипна щільність, кг/м^3; m_1 – маса пурки із зразком, кг; m_0 – маса порожньої пурки, кг; V – об’єм пурки, м^3.

Для визначення дійсної щільності брали відому масу зразка плодів рицини або його складових і занурювали у мірний циліндр із дистильованою водою відомого об’єму уникаючи утворення бульбашок. Далі визначали новий рівень води. Дійсну щільність розраховують за формулою:

$$\rho_d = \frac{m_s}{V_1 - V_0}, \qquad (3.2)$$

де ρ_d – дійсна щільність, кг/м^3; m_s – маса зразка, кг; V_0 – об'єм рідини у мірному циліндрі до занурення зразка, м^3; V_1 – об'єм рідини у мірному циліндрі після занурення зразка, м^3.

Похибка вимірювань пурки літрової ПХ-2 становить ±5 см^3, що може спричиняти похибку насипної щільності ±0,01 кг/м^3, лабораторні ваги ТВЕ-0.3 мають дискретність 0,001 г і похибку ±0,002 г, а мірний циліндр має похибку вимірювання об'єму ±2 мл.

Визначення кута природного укосу плодів рицини та їх складових є важливим параметром для оцінки сипучих властивостей матеріалу, що впливає на процеси транспортування та технологічної обробки. Для вимірювання використовується спеціалізоване обладнання (рис. 3.3, б). Методика визначення кута природного укосу передбачала формування конусу сипкого матеріалу шляхом повільного рівномірного висипання плодів або насіння рицини через воронку на горизонтальну поверхню до утворення природного насипного конусу. Висипання здійснювалось із постійної висоти (10–15 см), щоб забезпечити рівномірне накопичення матеріалу. Після формування конусу за допомогою лінійки та штангенциркуля вимірювали його висоту та діаметр основи. Кут природного укосу α розраховують за формулою:

$$\alpha = \operatorname{arctg}\left(\frac{2h}{d}\right), \tag{3.3}$$

де h – висота конусу насипаного матеріалу, м; d – діаметр основи насипаного матеріалу, м.

Похибка вимірювання цього методу залежала від точності інструментів і становила приблизно ±0,5°. Повторність вимірювання була триразова.

Визначення коефіцієнтів тертя ковзання та спокою плодів і насіння рицини о стінку обладнання виконувалось з використанням пристрою, який розроблений Алієвим Е.Б. (рис. 3.4) [180]. Принцип його роботи такий: на робочій поверхні розміщується пластина, матеріал якої ідентичний матеріалу стінки обладнання. В якості такого матеріалу використано сталь 40ХН і гуму 2959. Далі

зразок плоду або насіння рицини розміщували під вантажем, після чого на блоці керування активується режим вимірювання.



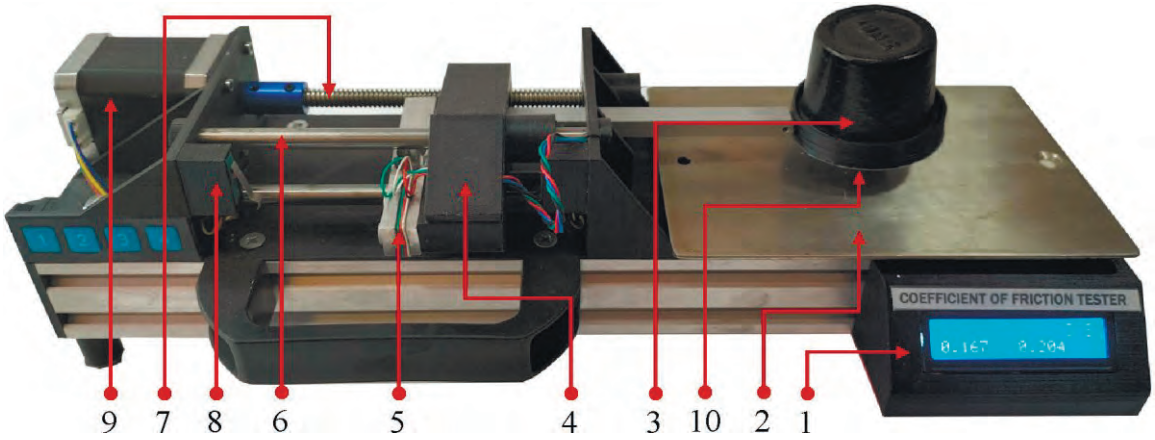
а б

Рисунок 3.3 – Визначення насипної щільності та кута природного укосу плодів рицини та їх складових з використанням літрової пурки ПХ-2 (а) та спеціалізованого обладнання для формування природного насипного конусу (б)

Під час роботи пристрою каретка, що рухається по направляючих, рівномірно зміщується під впливом гвинта, який приводиться в дію кроковим двигуном. Разом із кареткою переміщуються направляюча, вантаж і зразок. У процесі цього руху тензодатчик фіксує силу опору, а блок керування обчислює коефіцієнти тертя спокою μ і ковзання μ′. Інструментальна похибка вимірювань становить 0,01. Повторність вимірювання одного зразка була триразова.

Визначення швидкості витання плодів рицини та їх складових здійснювалось у спеціальній установці (рис. 3.5), що складається з циліндричної вертикальної аеродинамічної труби, вентилятора для створення повітряного потоку

із аеродинамічним стабілізатором (сітки) та анемометра Benetech GM816 для вимірювання швидкості повітряного потоку.

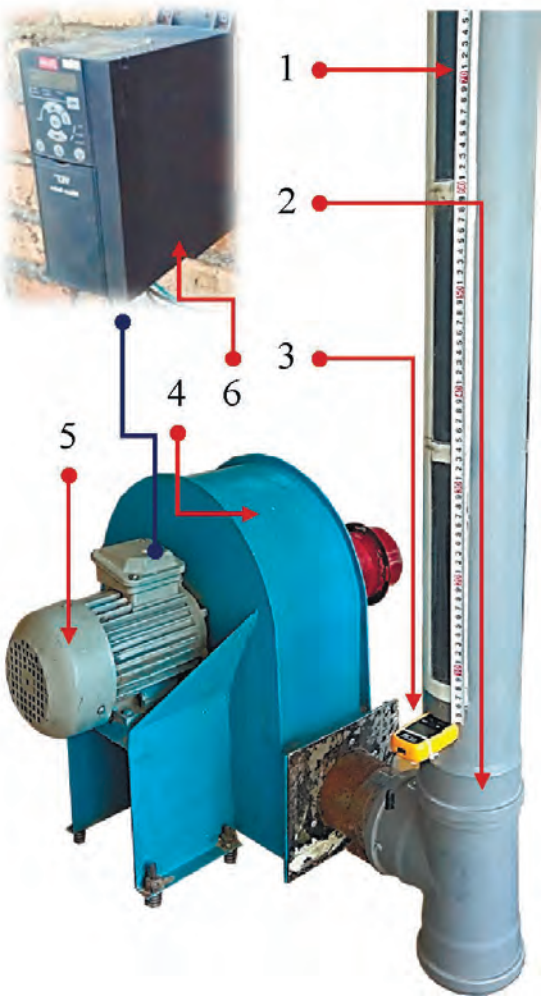


1 – блок керування; 2 – робочий стіл (сталь або гума); 3 – вантаж; 4 – каретка; 5 –тензодатчик; 6 – направляючі; 7 – гвинт; 8 – концевий вимикач; 9 – кроковий двигун; 10 – зразок

Рисунок 3.4 – Визначення коефіцієнтів тертя ковзання та спокою плодів і насіння рицини об стінку обладнання з використанням спеціалізовано пристрою

Зразки плодів рицини та їх складових поміщали у нижню частину труби на аеродинамічний стабілізатор перед увімкненням вентилятора. Після цього подачу повітряного потоку відцентрового вентилятора, з використанням частотного перетворювача Danfoss MicroDrive FC51, поступово збільшували до моменту, коли плід рицини або його складова починає підніматися і зависає у повітрі без руху вгору або вниз. У цей момент анемометром фіксується швидкість потоку повітря, яка вважається швидкістю витання для даного зразка. Похибка вимірювань швидкості потоку повітря анемометром Benetech GM816 становить 0,1 м/с. Повторність для зразка – триразова.

Реологічні властивості плодів і насіння рицини визначались з використанням пенетрометра, розробленого Алієвим Е. Б., Миколенко С. Ю., Дудіним В. Ю. [181, 182]. Загальний вигляд процесу вимірювання наведено на рис. 3.6.



1 – вертикальна аеродинамічна труба;

2 – аеродинамічний стабілізатор (сітка);

3 – анемометр Benetech GM816;

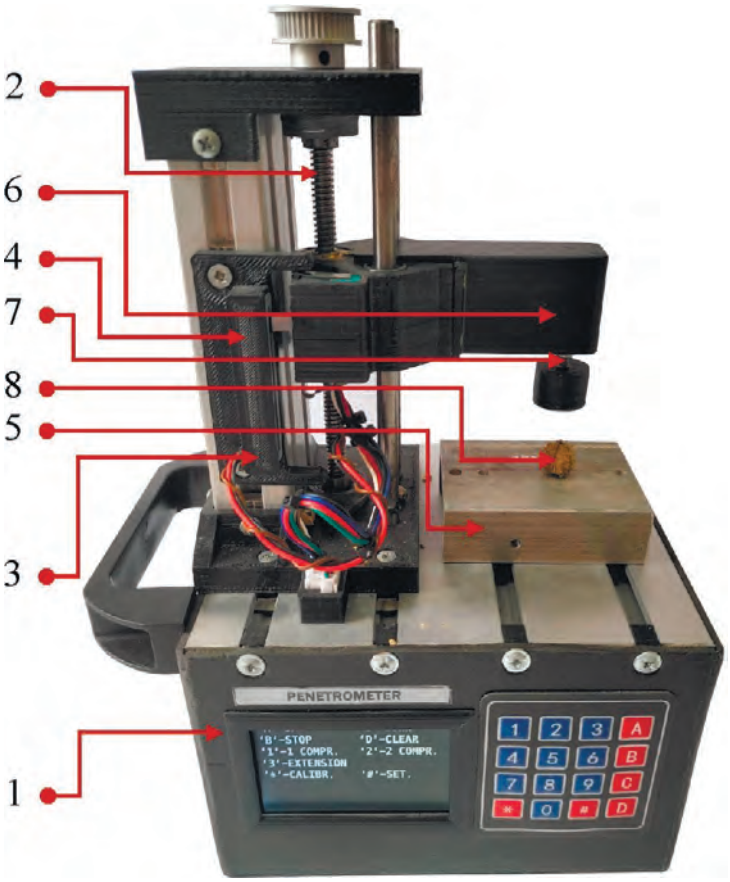
4 – відцентровий вентилятор;

5 – асинхронний трифазний електродвигун;

6 – частотний перетворювач Danfoss Micro Drive FC51

Рисунок 3.5 – Визначення швидкості витання плодів рицини та їх складових з використанням спеціалізованого обладнання

Функціонування пристрою відбувається за таким принципом: у зону під індентором циліндричної форми (діаметр – 20 мм), що закріплений на тензодатчику з можливістю вертикального переміщення, поміщається плід або насіння рицини на робочий стіл. Попередньо тензодатчик разом із закріпленим на ньому індентором проходить калібрування, при якому в стані спокою він відповідає нульовому зусиллю. Далі індентор починає рівномірний вертикальний рух вниз. Момент, коли індентор стикається з компонентом, призводячи до збільшення зусилля на тензодатчику, фіксується як початок вимірювального процесу. У ході вимірювання визначається залежність сили стискання F (Н) і абсолютної деформації Δx (мм) від часу t (с). Похибка вимірювань для F становить 0,1 Н, а для Δx – 0,01 мм.



1 – блок управління пенетрометра;

2 – модуль вертикального переміщення;

3 – модуль вимірювання відстані;

4 – модуль кінцевих вимикачів;

5 – робочий стіл;

6 – тензодатчик;

7 – індентор циліндричної форми;

8 – зразок плоду або насіння рицини

Рисунок 3.6 – Дослідження реологічних властивостей плодів і насіння рицини з використанням пенетрометра

3.3 Розробка стенду для дослідження машини для очищення насіння рицини

Стенд для дослідження машини для очищення насіння рицини (рис. 3.7) призначений для експериментального вивчення процесу виділення насінин із плодів, а також очищення їх від домішок з подальшим розділенням на відповідні фракції. Конструктивно стенд являє собою систему взаємопов’язаних вузлів, закріплених на жорсткій станині, яка забезпечує надійну фіксацію обладнання та стійкість під час роботи. Подання сировини здійснюється через завантажувальний бункер, звідки суміш плодів рицини надходить у вузол відокремлення насінин. Основними елементами цього вузла є дробильний та зворотній конуси, змонтовані в корпусі з внутрішньою футеровкою (рис. 3.8).



1 – станина; 2 – система відокремлення насінин рицини від плодів; 3 – завантажувальний бункер; 4 – система аеродинамічного очищення; 5 – пневмосепаруючий канал; 6 – циклон; 7 – відцентровий вентилятор; 8 – електродвигун вентилятора; 9 – основний електродвигун; 10 – забірник насіння; 11 – забірник нерозлущених плодів; 12 – забірник частинок коробочок; 13 – забірник дрібних частинок і пилу; 14 – блок керування; 15 – частотний перетворювач Danfoss Micro Drive

Рисунок 3.7 – Стенд для дослідження машини для очищення насіння рицини

Механічна дія між дробильними елементами, яка забезпечує руйнування плодів і вивільнення насіння, регулюється за допомогою гвинтового механізму, що дозволяє змінювати зазор між конусами. Обертання дробильного механізму забезпечується через конусний ексцентриковий стакан-вал, який приводиться в дію від основного електродвигуна через систему передачі, що включає кутовий редуктор, шківи та ремінь. Синхронізація руху окремих елементів досягається за допомогою ланцюгової передачі із зірочками. Додатково конструкція включає

зовнішню футеровку та розподільник, який сприяє рівномірному завантаженню дробильного вузла.



1 – зворотній конус; 2 – дробильний конус; 3 – корпус із внутрішньою футеровою; 4 – регулювальний гвинт; 5 – зірочка; 6 – ланцюг; 7 – зовнішня футеровка; 8 – розподільник; 9 – конусний ексцентриковий стакан-вал; 10 – кутовий редуктор; 11 – ведений шків; 12 – ведучий шків; 13 – ремінь; 14 – основний електродвигун

Рисунок 3.8 – Окремі елементи стенду для дослідження машини для очищення насіння рицини

Після механічного розділення суміш подається в систему аеродинамічного очищення, що складається з пневмосепаруючого каналу, вентилятора та циклону. У пневмосепаруючому каналі відбувається поділ частинок за аеродинамічними властивостями, де легкі домішки та пил відокремлюються від важчих фракцій. Повітряний потік у системі створюється відцентровим вентилятором, який працює від окремого електродвигуна. Вловлювання легких частинок здійснюється у циклоні, звідки вони надходять у відповідні забірники. У конструкції передбачено забірник насіння, забірник нерозлущених плодів, забірник частинок коробочок, а також забірник дрібних частинок і пилу, що забезпечує повний цикл сепарації.

Робота стенду контролюється з блока керування, оснащеного частотним перетворювачем Danfoss Micro Drive, який дозволяє точно регулювати швидкість обертання електродвигунів залежно від властивостей вхідної сировини.

Стенд забезпечує можливість детального вивчення параметрів процесу очищення, регулювання режимів роботи та оцінки ефективності відокремлення насіння від частинок вороху.

Для проведення експериментальних досліджень на стенді очищення насіння рицини використовувалися сучасні вимірювальні прилади, що забезпечують точне визначення параметрів робочого процесу.

Частотний перетворювач Danfoss Micro Drive (серія VLT® Micro Drive FC 51) застосовується у складі стенду для дослідження машини з очищення насіння рицини як пристрій керування електродвигуном і водночас як засіб вимірювання потужності, що споживається приводом у процесі роботи. Цей компактний і надійний перетворювач забезпечує плавне регулювання частоти обертання електродвигуна в діапазоні від 0 до 50 Гц, працює від трифазної мережі живлення з напругою 380–480 В та підтримує діапазон потужностей двигуна до 7,5 кВт. Пристрій обладнаний цифровим інтерфейсом, що дозволяє виводити на дисплей миттєві значення електричної потужності, струму, напруги, коефіцієнта навантаження, а також накопиченої енергії в кВт·год. У дослідженнях частотний перетворювач Danfoss Micro Drive виконує функцію моніторингу енергоспоживання в реальному часі, що дає змогу оцінити ефективність роботи дробильного вузла, аналізувати зміну навантаження при різних режимах подачі та регулювання зазору між конусами, а також визначати оптимальні технологічні параметри з точки зору мінімізації споживання електроенергії. Похибка вимірювання потужності складає ±2 Вт. Завдяки вбудованим функціям вимірювання перетворювач дозволяє обійтися без додаткових енергометрів, забезпечуючи при цьому високу точність і зручність отримання даних у ході експериментів.

Основним пристроєм вимірювання є багатофункціональний вимірювальний прилад Solomat MPM500 (рис. 3.9), який призначений для реєстрації та аналізу параметрів повітряного потоку. Він дозволяє підключати різноманітні датчики, забезпечуючи високу точність вимірювань та зручність під час проведення досліджень. Для вимірювання швидкості повітряного потоку в аеродинамічній системі використовувався набір датчиків, сумісних із Solomat MPM500, що

забезпечують вимірювання швидкості з високою роздільною здатністю і чутливістю – ±0,1 м/с. Це дозволило точно визначити режими роботи пневмосепаруючого каналу та оцінити ефективність поділу частинок за аеродинамічними властивостями.



1 – багатофункціональний вимірювальний пристрій Solomat MPM500; 2 – набір датчиків для вимірювання швидкості потоку повітря; 3 – тахометр Benetech GM8905

Рисунок 3.9 – Прилади для проведення експериментальних досліджень

Для контролю частоти обертання робочих органів машини застосовувався тахометр Benetech GM8905 (рис. 3.9), який є портативним цифровим приладом контактного й безконтактного типу. Він забезпечує вимірювання обертів у діапазоні від 2,5 до 9999 об/хв з точністю ±0,1 об/хв, що дозволяє з високою достовірністю фіксувати швидкість обертання дробильних елементів, шківів, вентиляторів та інших обертових механізмів.

Для визначення маси різних фракцій продукту, отриманих у результаті роботи машини для очищення насіння рицини, у процесі експериментальних досліджень використовувались електронні товарні ваги ВП1-Тв (БК). Це сучасний вимірювальний прилад, призначений для точного зважування матеріалів у межах до 60 кг, який широко застосовується в лабораторних і виробничих умовах. Ціна

поділки становить 20 г, що забезпечує достатню точність для фіксації результатів у дослідженнях фракційного складу продукту після очищення.

Застосування даних приладів дало змогу комплексно оцінити режими роботи машини, забезпечити точність і відтворюваність результатів досліджень, а також встановити оптимальні параметри для ефективного очищення насіння рицини.

3.4 Методика експериментальних досліджень машини для очищення насіння рицини

Дослідження проведені в Інституті олійних культур НААН. Процес проведення експериментальних досліджень роботи машини для очищення насіння рицини (рис. 3.10) виконувався відповідно до заздалегідь розробленої методики, з дотриманням послідовності дій, налаштуванням обладнання та фіксацією необхідних параметрів. Експерименти проводились на базі дослідного стенду, що включає механічну, пневматичну, аеродинамічну та електротехнічну складові, а також контрольно-вимірювальні прилади.

Перед початком кожного досліду здійснювалося попереднє налаштування частотного перетворювача Danfoss Micro Drive, який забезпечував зміну частоти обертання основного електродвигуна дробильної системи і частити обертання відцентрового вентилятора. Задавалися необхідні значення частоти (Гц), які відповідали певним швидкісним режимам. Одночасно через цифровий інтерфейс частотного перетворювача здійснювався моніторинг електроспоживання (у кВт) для подальшого аналізу енергетичної ефективності процесу.

Після цього проводилось налаштування вимірювальних приладів. Зокрема, багатофункціональний прилад Solomat MPM500 з відповідними сенсорами встановлювався в точках контролю швидкості повітряного потоку в пневмосепаруючому каналі. Датчики під’єднувалися до головного блоку, а на дисплеї задавались необхідні параметри режиму роботи. Також у ході підготовки використовувався тахометр Benetech GM8905, за допомогою якого вимірювалась частота обертання валів і шківів приводу, зокрема конусного ексцентрикового

стакана дробильної системи. Це дозволяло підтвердити відповідність реальних швидкостей заданим режимам роботи.



Налаштування частотного перетворювача



Налаштування приладів



Вимірювання швидкості потоку повітря



Завантаження плодів рицини

Рисунок 3.10 – Процес проведення експериментальних досліджень

Наступним етапом було вимірювання швидкості повітряного потоку в системі аеродинамічного очищення. Для цього використовували набір анемометричних

датчиків, підключених до Solomat MPM500. Швидкість повітряного потоку реєструвалася в кількох точках пневмосистеми: на вході та виході з вентилятора, у каналі сепарації та перед циклоном. Це дозволяло визначити ефективність пневмосепарації та стабільність повітряного режиму.

Відстань між зворотнім і дробильним конусами – це регульований технологічний параметр, який визначає розмір зазору в зоні подрібнення плодів рицини. Величина цієї відстані безпосередньо впливає на якість руйнування коробочок, ступінь відокремлення насіння та запобігання його пошкодженню. Регулювання відстані здійснюється за допомогою регулювального гвинта, що дозволяє точно встановити необхідний зазор залежно від розміру і твердості плодів. Типові значення δ можуть змінюватися в межах від 0 до 20 мм, залежно від режиму дослідження. Менші значення забезпечують інтенсивніше подрібнення, але можуть спричинити пошкодження насіння, тоді як більші – сприяють збереженню цілісності насіння, але можуть бути недостатніми для ефективного подрібнення плодів.

Після підготовки системи та приладів виконувалося завантаження плодів рицини у приймальний бункер машини масою 50 кг. Маса кожної порції попередньо зважувалась на електронних товарних вагах ВП1-Тв (БК), після чого фіксувалася у протоколі досліду. Завантаження здійснювалось рівномірно, щоб уникнути перевантаження вузлів подрібнення та сепарації.

В якості факторів досліджень обрано конструктивно-технологічні параметри, які найбільше випливають на процес відокремлення і очищення насіння рицини (табл. 3.1):

– відстань між зворотнім і дробильним конусами δ (мм);

– частота обертання дробильного конусу n (об/хв);

– швидкість повітряного потоку V (м/с).

Після завершення кожного досліду проводилось вивантаження продуктів сепарації (рис. 3.11) з відповідних забірників (насіння, частинок коробочок, пил, тощо) з подальшим зважуванням та протоколюванням. На підставі отриманих даних виконувалось обчислення показників ефективності очищення, питомої витрати енергії, продуктивності та якості роботи машини при різних режимах.



Плоди рицини (вихідний матеріал) | Частинки коробочок | Насіння

Рисунок 3.11 – Результати відокремлення насіння від коробочок

Таблиця 3.1 – Інтервали варіювання факторами досліджень

Назва фактору	Відстань між зворотнім і дробильним конусами	Частота обертання дробильного конусу	Швидкість повітряного потоку
Позначення	δ, мм	n, об/хв	V, м/с
Кодоване позначення	x_1	x_2	x_3
-1	0	200	2
0	10	300	4
1	20	400	6
Δ	10	100	2

В якості критеріїв дослідження обрано:

– продуктивність машини Q (кг/год), яка визначалась відношенням маси вихідного матеріалу до часу роботи;

– споживана потужність машини P (Вт), яка визначалась за даними з частотного перетворювача;

– питомі витрати електроенергії E (МДж/кг), яка розраховувалась як відношення потужності P до продуктивності Q;

– частка нерозлущених плодів та сегментів ξ_f, яка визначалась шляхом відбору проб масою 300 г в триразовій повторності;

– вміст ліквідного насіння у забірнику насіння $\psi_{s\text{-}s}$, яка визначалась шляхом відбору проб масою 300 г в триразовій повторності.

Експериментальні дослідження проводилися згідно з планом Бокса-Бенкіна для трьох факторів, кожен із яких варіювався на трьох рівнях (загальна кількість – 15 дослідів). Повторність кожного досліду становила три, що забезпечило можливість оцінювання впливу факторів як окремо, так і у взаємодії, а також дозволило здійснити перевірку адекватності отриманої математичної моделі.

Таким чином, весь процес проведення експериментальних досліджень був спрямований на всебічну оцінку функціонування машини, визначення впливу основних технологічних параметрів на ефективність очищення та обґрунтування оптимальних режимів її роботи.

3.5 Методика статистичної обробки експериментальних даних

Методика статистичної обробки експериментальних даних з використанням програмного пакету Wolfram Cloud передбачає послідовне виконання кількох етапів, які охоплюють кодування факторів, побудову рівняння регресії, аналіз значущості коефіцієнтів, перевірку адекватності моделі, побудову поверхонь відгуку та проведення оптимізації [183, 184, 185, 186, 187, 188].

На першому етапі здійснюється кодування факторів дослідження, тобто приведення натуральних значень змінних (наприклад, фізичних величин) до безрозмірного нормованого вигляду. Це виконується шляхом обчислення відхилення кожного значення від центрального (середнього) значення фактору і поділу на варіаційний інтервал, що дорівнює половині діапазону зміни даного фактору. В результаті отримують нормовані значення, які зазвичай змінюються в межах від –1 до +1.

Після цього формується регресійна модель за допомогою функції NonlinearModelFit, яка дозволяє апроксимувати експериментальні дані нелінійною

регресією. У контексті багатофакторного експерименту зазвичай використовується модель другого порядку, яка містить лінійні члени, квадратичні члени і попарні добутки змінних (взаємодії). На основі цієї моделі розраховуються оцінки коефіцієнтів регресії, які в подальшому аналізуються на значущість.

Для визначення статистичної значущості коефіцієнтів регресії застосовується критерій Стьюдента, результати розрахунку якого виводяться за допомогою функції ParameterTable. Ця таблиця містить значення коефіцієнтів, їх стандартні похибки, t-статистики та p-значення. Коефіцієнти вважаються статистично незначущими, якщо p-значення перевищує 0,05, і в подальшому вони можуть бути вилучені з моделі. Після цього модель регресії уточнюється шляхом повторного підбору без незначущих членів.

Наступним кроком є перевірка адекватності побудованої моделі за допомогою дисперсійного аналізу (ANOVA). Для цього використовується функція ANOVATable, яка виводить дисперсії, середні квадрати, значення критерію Фішера та p-значення. Модель вважається адекватною, якщо p-значення для регресії є меншим за 0,05, що свідчить про її відповідність експериментальним даним у межах обраного рівня довіри.

Візуалізація результатів виконується шляхом побудови поверхонь відгуку, які дають змогу оцінити вплив двох факторів на величину вихідної змінної за фіксованих значень інших змінних. Це реалізується за допомогою функції Plot3D, яка відображає зміну відгуку у вигляді просторової поверхні над площиною факторів.

Для визначення оптимальних умов експерименту проводиться пошук мінімуму або максимуму функції відгуку. У випадку одного критерію цільову функцію оптимізують за допомогою методів чисельної мінімізації або максимізації, використовуючи функції FindMinimum та FindMaximum. При цьому можуть задаватися обмеження на допустимі значення факторів у межах кодованого інтервалу.

У разі, коли критерії оптимізації є багаточисельними (наприклад, максимізація виходу і мінімізація енергоспоживання), застосовується метод скалярного

ранжування, який передбачає побудову мультиплікативної функції переваги. Ця функція є добутком нормалізованих критеріїв, зважених відповідно до їх значущості (ваг). Оптимізація здійснюється шляхом мінімізації або максимізації цієї агрегованої функції в межах допустимих значень факторів.

Загалом, використання Wolfram Cloud дає змогу реалізувати повний цикл статистичної обробки експериментальних даних – від кодування факторів до побудови моделей, їх аналізу, візуалізації та оптимізації, що забезпечує гнучкість і високу точність при дослідженні складних технічних та природничих об’єктів.

3.6 Висновки з розділу

1. Методика лабораторних досліджень фізико-механічних властивостей плодів рицини та їх складових (сегменти, насіння, частинки коробочки) забезпечує комплексне і достовірне визначення ключових параметрів, що впливають на процеси зберігання, транспортування та переробки. Наведені приватні методики проведення вимірювання вологості, геометричних розмірів, маси, насипної та дійсної щільності, кута природного укосу, коефіцієнтів тертя ковзання і спокою, швидкості витання, а також реологічних характеристик із використанням високоточних приладів і спеціалізованого обладнання при контрольованих умовах температури та вологості повітря. Висока повторність і точність вимірювань забезпечують надійність отриманих даних, що є основою для подальших досліджень та оптимізації технологічних процесів у виробництві і переробці рицини.

2. Розроблений стенд для дослідження машини очищення насіння рицини забезпечує комплексне і точне вивчення процесів відокремлення насіння від плодів, очищення від домішок та розділення на фракції. Інтеграція механічних і аеродинамічних систем, а також застосування сучасних приладів для вимірювання параметрів робочого процесу дають змогу оптимізувати режими роботи, підвищити ефективність сепарації та мінімізувати енергоспоживання, що є важливим для підвищення продуктивності і якості очищення насіння рицини.

3. Розроблена методика проведення експериментальних досліджень машини для очищення насіння рицини забезпечує системний, комплексний і надійний підхід до оцінки її роботи. Методика передбачає чітку послідовність дій, що включає налаштування частотного перетворювача, контрольно-вимірювальних приладів та проведення вимірювань ключових параметрів технологічного процесу – швидкості повітряного потоку, частоти обертання дробильного конусу та відстані між конусами. Використання сучасних приладів і цифрових інтерфейсів дозволяє отримувати точні і відтворювані дані, що є основою для подальшого аналізу ефективності машини. Застосування плану Бокса-Бенкіна для організації експериментів з трьома регульованими факторами і трьома рівнями їх варіювання, а також проведення повторних дослідів, забезпечило статистично обґрунтовану оцінку впливу окремих параметрів і їх взаємодій на результати очищення. Отримані кількісні показники – продуктивність, споживана потужність, питомі енерговитрати, частка нерозлущених плодів і вміст ліквідного насіння – дають можливість всебічно оцінити технологічні та енергетичні характеристики роботи машини.

Основні наукові результати розділу опубліковано в працях автора [171, 189, 190, 191, 192, 193].

4 АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ПРОЦЕСУ ОЧИЩЕННЯ НАСІННЯ РИЦИНИ

4.1 Результати лабораторних досліджень фізико-механічних властивостей плодів рицини та їх складових

Плід рицини овально-куляста тригнізда коробочка, яка може розтріскуватися, гола або зі шпичаками, тринасінна, тристулчаста. В ході лабораторних досліджень було передбачено визначення основних фізико-механічних властивостей плоду, сегменти (стулки), насіння і частинок коробочки, яке отримане в результаті попередньої підготовки насіннєвого матеріалу рицини. Дані властивості використовувалися для симуляції процесів відокремлення і очищення насіння рицини.

Першим етапом було розділення компонентів насіннєвої суміші рицини на окремі групи (плоди, сегменти, насіння, частинки коробочки), які наведені на рис. 4.1.



Плоди



Сегменти (стулки)



Насіння



Частинки коробочки

Рисунок 4.1 – Фото окремих груп компонентів насіннєвої суміші рицини

Всі лабораторні дослідження були проведені у відповідності методик, які викладені в розділі 3.2 з використанням відповідного спеціалізованого обладнання.

Вологість плодів рицини та їх складових складала в середньому 6,82±0,74%.

В результаті лабораторних досліджень визначені ***геометричні розміри (довжина, ширина) і маса плодів рицини та їх складових***, розподіл яких наведений на рис. 4.2.

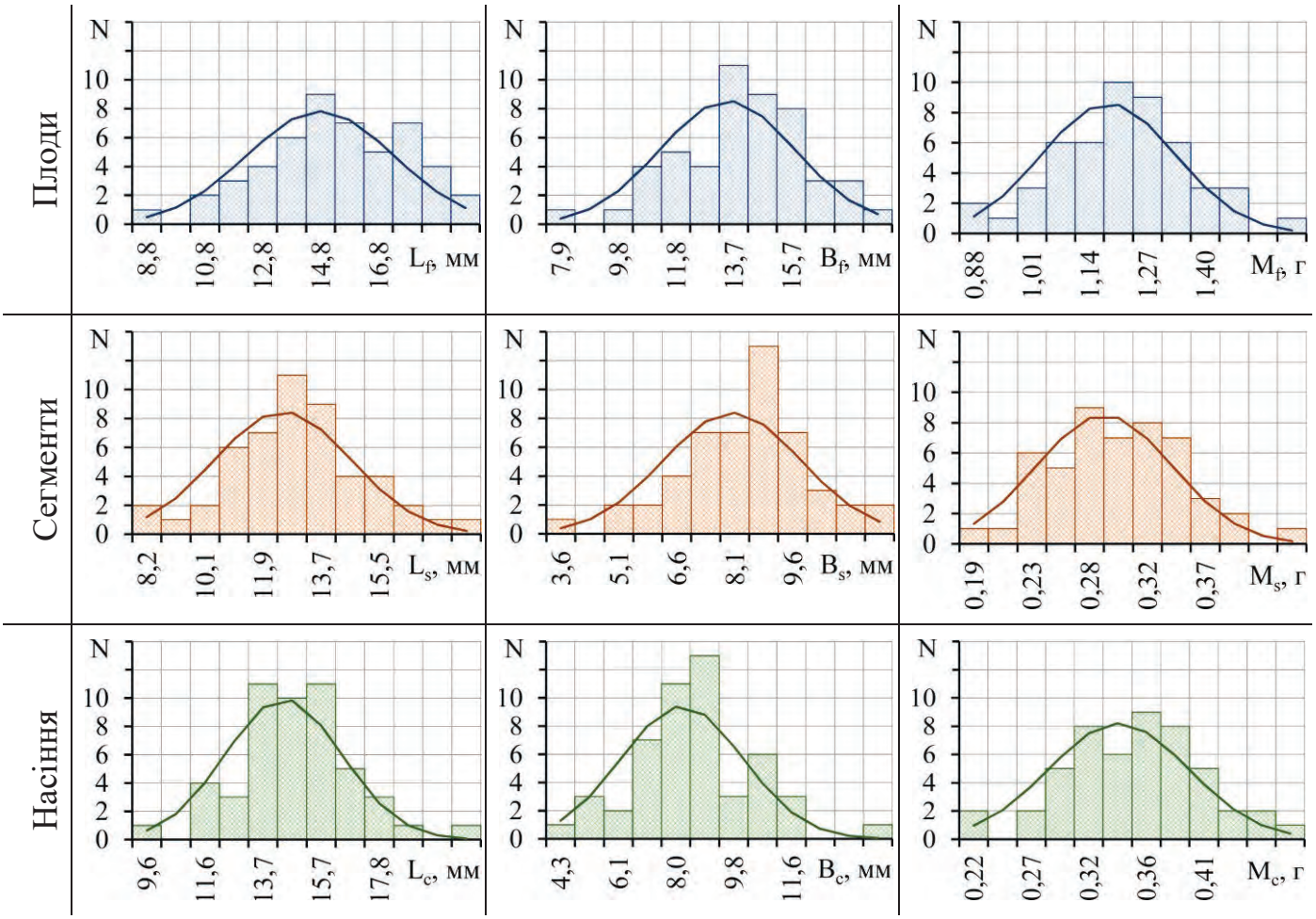


Рисунок 4.2 – Розподіли значень геометричних розмірів (довжини L, ширини B) і маси M плодів рицини та їх складових

Результати ***визначення насипної і дійсної щільності, кута природного укосу плодів рицини та їх складових*** представлено у вигляді гістограм розподілів на рис. 4.3. Гістограми дають змогу наочно оцінити варіабельність показників щільності та визначити закономірності їх розподілу.

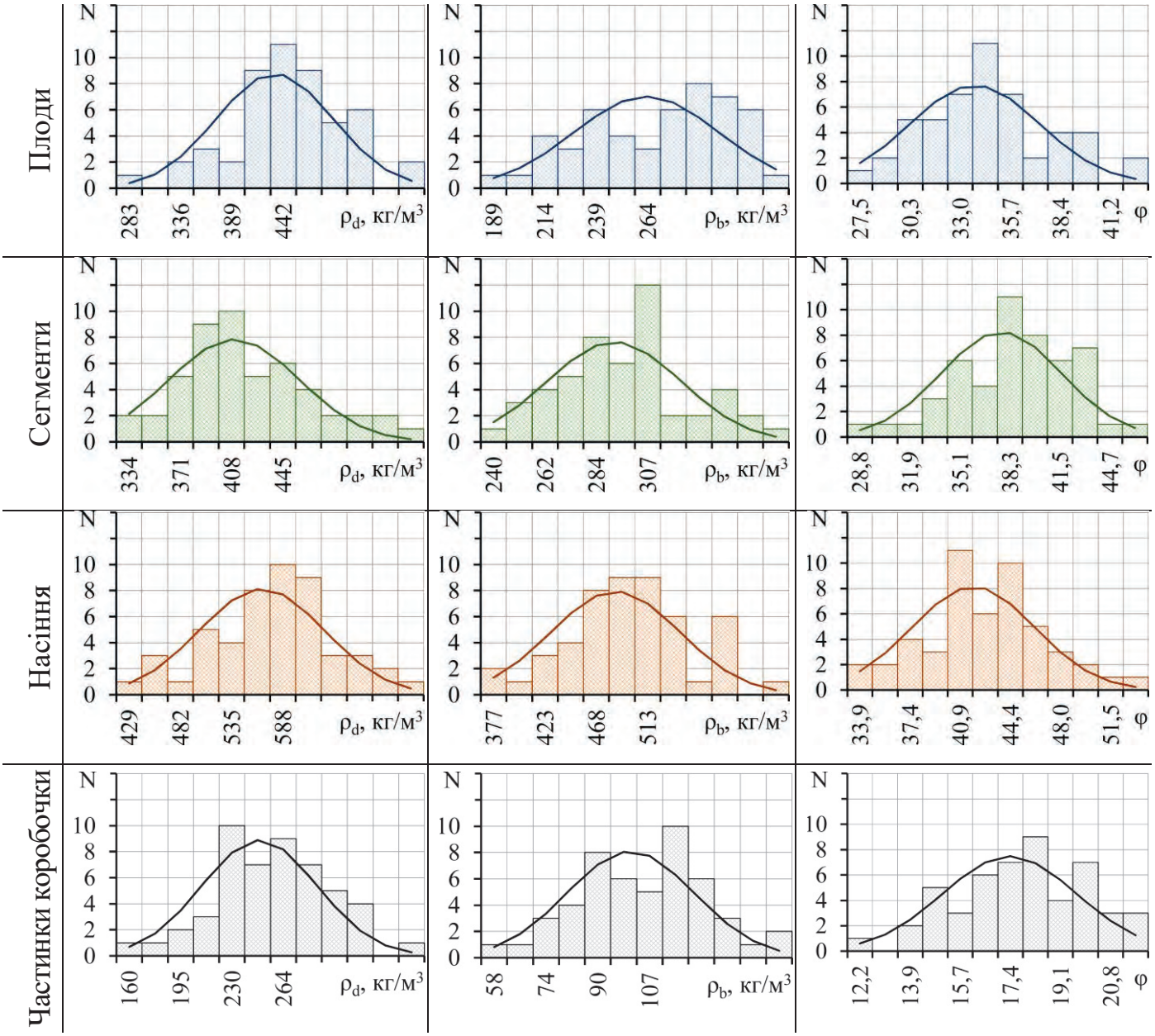


Рисунок 4.3 – Розподіли значень насипної ρ_b і дійсної ρ_d щільності, кута природного укосу φ плодів рицини та їх складових

Результати ***визначення коефіцієнтів тертя ковзання і спокою плодів рицини та їх складових об стінку обладнання*** представлено у вигляді гістограм розподілів на рис. 4.4. Аналіз отриманих даних свідчить про відмінності у значеннях цих параметрів для різних складових рицини, що може впливати на особливості їх транспортування та переробки.

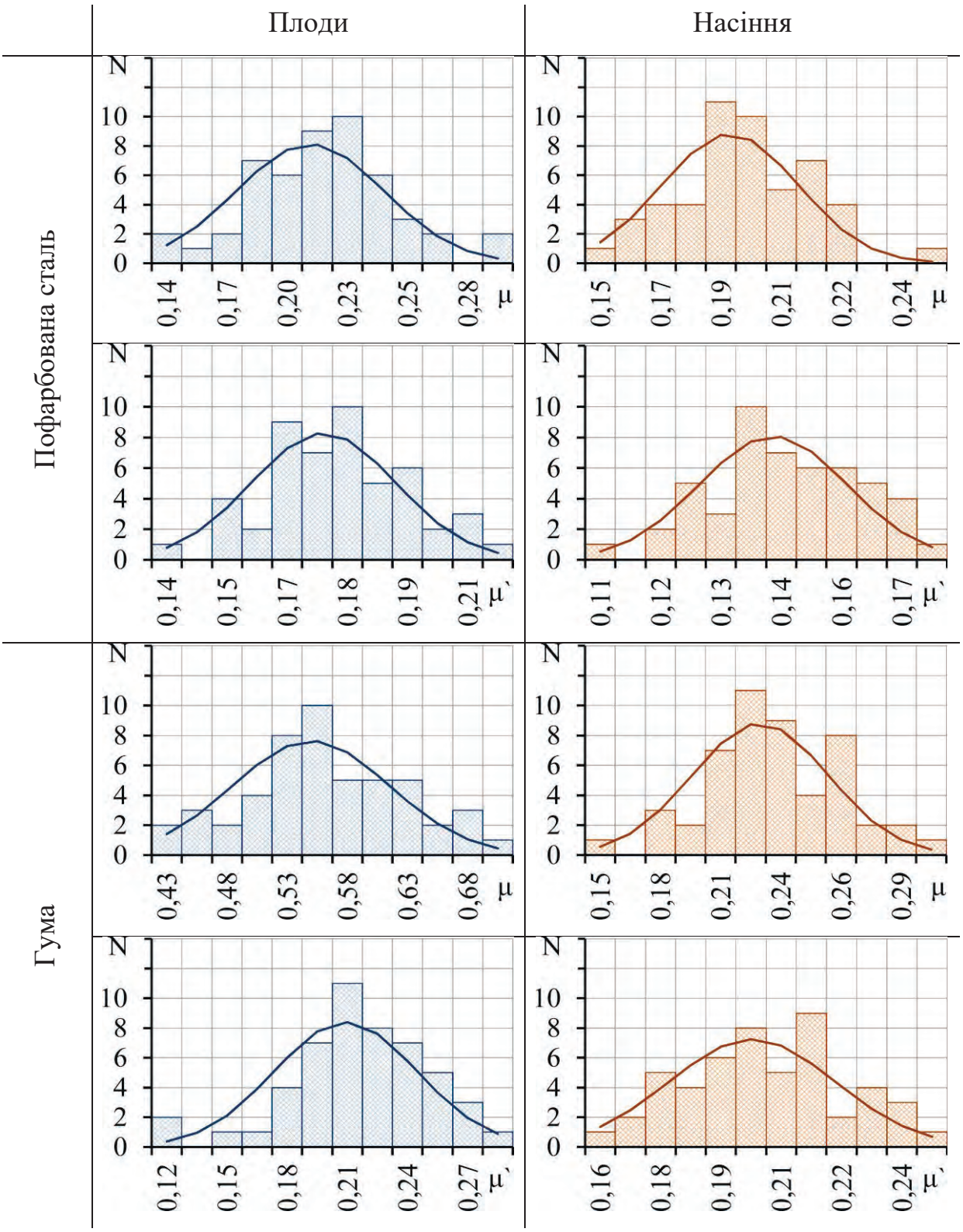


Рисунок 4.4 – Розподіли значень коефіцієнтів тертя ковзання μ` і спокою μ плодів рицини та їх складових об стінку обладнання

Результати ***визначення швидкості витання плодів рицини та їх складових*** представлено у вигляді гістограм розподілів на рис. 4.5. Визначення швидкості

витання плодів рицини та їх складових необхідне для оптимізації процесів пневмосепарації, очистки та транспортування матеріалу. Цей параметр дозволяє встановити ефективні режими роботи повітряних сепараторів, забезпечуючи розділення частинок за їх густиною та аеродинамічними властивостями.

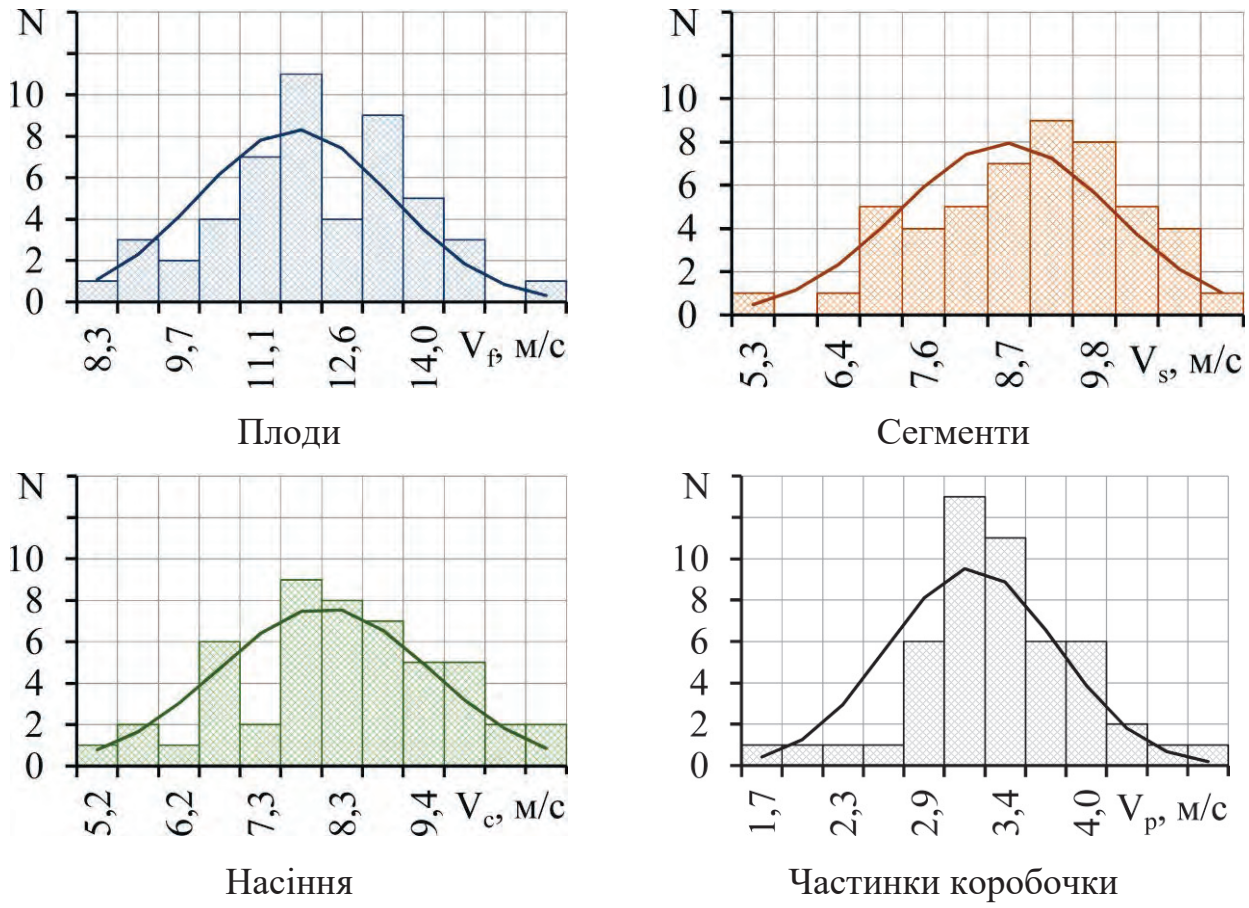


Рисунок 4.5 – Розподіли значень швидкості витання V плодів рицини та їх складових

Узагальнена таблиця даних та результатів статистичного аналізу визначених фізико-механічних властивостей плодів рицини та їх складових наведено в табл. 4.1.

Отримані результати статистичної обробки варіаційних рядів фізико-механічних властивостей плодів рицини та їх складових свідчать про значні відмінності між їх параметрами.

Таблиця 4.1 – Результати статистичної обробки варіаційних рядів розподілів визначених фізико-механічних властивостей плодів рицини та їх складових

Показ.	Плоди			Сегменти			Насіння			Частинки коробочки		
	Знач.	χ^2	R	Знач.	χ^2	R	Знач.	χ^2	R	Знач.	χ^2	R
L, мм	14,8 ± 2,2	7,43	0,86	14,4 ± 1,6	13,96	0,82	12,5 ± 1,8	7,70	0,90	–	–	–
B, мм	13,5 ± 1,9	8,54	0,85	7,8 ± 1,7	9,32	0,84	7,1 ± 1,5	9,90	0,84	–	–	–
M, г	1,18 ± 0,13	8,77	0,91	0,34 ± 0,05	7,90	0,88	0,29 ± 0,04	8,03	0,92	–	–	–
ρ_b, кг/м^3	264 ± 30	13,04	0,54	292 ± 24	11,64	0,75	485 ± 48	16,11	0,82	101 ± 17	9,16	0,81
ρ_d, кг/м^3	434 ± 51	15,01	0,84	410 ± 39	10,62	0,89	567 ± 54	7,53	0,83	248 ± 33	8,92	0,89
φ, °	33,8 ± 3	15,56	0,83	37,7 ± 3,2	10,29	0,80	41,8 ± 3,6	8,51	0,82	17,4 ± 1,9	9,39	0,79
μ_{st}	0,209 ± 0,028	14,01	0,89	–	–	–	0,191 ± 0,017	14,92	0,87	–	–	–
μ_{rub}	0,548 ± 0,056	8,38	0,83	–	–	–	0,226 ± 0,026	10,57	0,85	–	–	–
$\mu`_{st}$	0,174 ± 0,015	10,01	0,85	–	–	–	0,141 ± 0,013	8,20	0,84	–	–	–
$\mu`_{rub}$	0,207 ± 0,029	13,88	0,88	–	–	–	0,199 ± 0,017	7,32	0,79	–	–	–
V, м/с	11,75 ± 1,43	10,49	0,80	8,11 ± 1,14	7,70	0,80	8,65 ± 1,2	7,69	0,84	3,21 ± 0,51	12,74	0,86

Геометричні характеристики (довжина L та ширина B) поступово зменшуються при переході від цілих плодів до насіння, що пояснюється процесом сегментації плодів і подальшого відокремлення насіння від оболонки. Плоди мають найбільші розміри (L = 14,8 ± 2,2 мм, B = 13,5 ± 1,9 мм), тоді як насіння суттєво менше (L = 12,5 ± 1,8 мм, B = 7,1 ± 1,5 мм). Дані підтверджують, що насіння має більш стабільні розміри, оскільки коефіцієнт кореляції (R) для його довжини та ширини складає 0,84–0,90, що вказує на високу однорідність вибірки.

Маса досліджуваних об'єктів також змінюється у відповідності до структури плодів: найбільша маса спостерігається у плодів (1,18 ± 0,13 г), тоді як сегменти (0,34 ± 0,05 г) та насіння (0,29 ± 0,04 г) мають значно меншу вагу. Високі значення коефіцієнта кореляції (R = 0,88–0,92) свідчать про стабільність цього показника.

Щільність плодів та їх компонентів змінюється залежно від їх структури. Насипна щільність (ρ_b) є найвищою для насіння (485 ± 48 кг/м³), тоді як плоди мають значно нижче значення (264 ± 30 кг/м³), що пов’язано з наявністю повітряних порожнин у внутрішній частині плодів. Дійсна щільність (ρ_d) є також найбільшою у насіння (567 ± 54 кг/м³), тоді як для плодів вона нижча (434 ± 51 кг/м³), а мінімальна для частинок коробочки (248 ± 33 кг/м³), що пояснюється їх пухкою структурою. Дані підтверджують, що насіння є найбільш щільною складовою рицини, що впливає на їх поведінку під час сепарації та очищення.

Кут природного укосу (φ) свідчить про сипучі властивості матеріалів. Плоди мають φ = 33,8 ± 3°, тоді як сегменти характеризуються вищим значенням (37,7 ± 3,2°), що вказує на їх меншу сипучість і більшу схильність до злипання. Це пояснюється їх неправильною формою та наявністю залишків оболонки, що підвищує внутрішнє тертя.

Коефіцієнти тертя демонструють значну варіабельність між досліджуваними складовими. Плоди мають найвищий коефіцієнт тертя ковзання (μ_{rub} = 0,548 ± 0,056), що пояснюється їх шорсткою поверхнею та наявністю оболонки. Для насіння цей показник значно нижчий (0,226 ± 0,026), що свідчить про його гладку поверхню. Статичне тертя (μ_{st}) також знижується від плодів (0,209 ± 0,028) до насіння (0,191 ± 0,017), що підтверджує покращену рухомість насіння під час транспортування та очищення.

Швидкість витання (V) є важливим параметром, що впливає на сепарацію насіння. Найбільшу швидкість витання мають плоди (11,75 ± 1,43 м/с), що пов’язано з їх великою масою та значним аеродинамічним опором. Сегменти та насіння мають нижчі швидкості (8,11 ± 1,14 м/с та 8,65 ± 1,2 м/с відповідно), що дозволяє їх ефективно відокремлювати від плодів. Найнижче значення спостерігається у частинок коробочки (3,21 ± 0,51 м/с), що підтверджує їх малу щільність та легкість.

Таким чином, отримані дані свідчать про закономірні зміни фізико-механічних характеристик компонентів рицини, що пояснюється їх морфологічною будовою та структурними особливостями.

Дослідження ***реологічних властивостей плодів і насіння рицини*** передбачали почерговий їх стиск з використанням пенетрометра. Кількість зразків (повторність) для кожної групи складала 50.

Приклади отриманих залежностей сили стиску F (Н) плодів і насіння рицини від часу t (с) або абсолютної деформації Δx (мм) з урахуванням постійної швидкості руху індентора (4 мм/с) наведені на рис. 4.6-4.7.

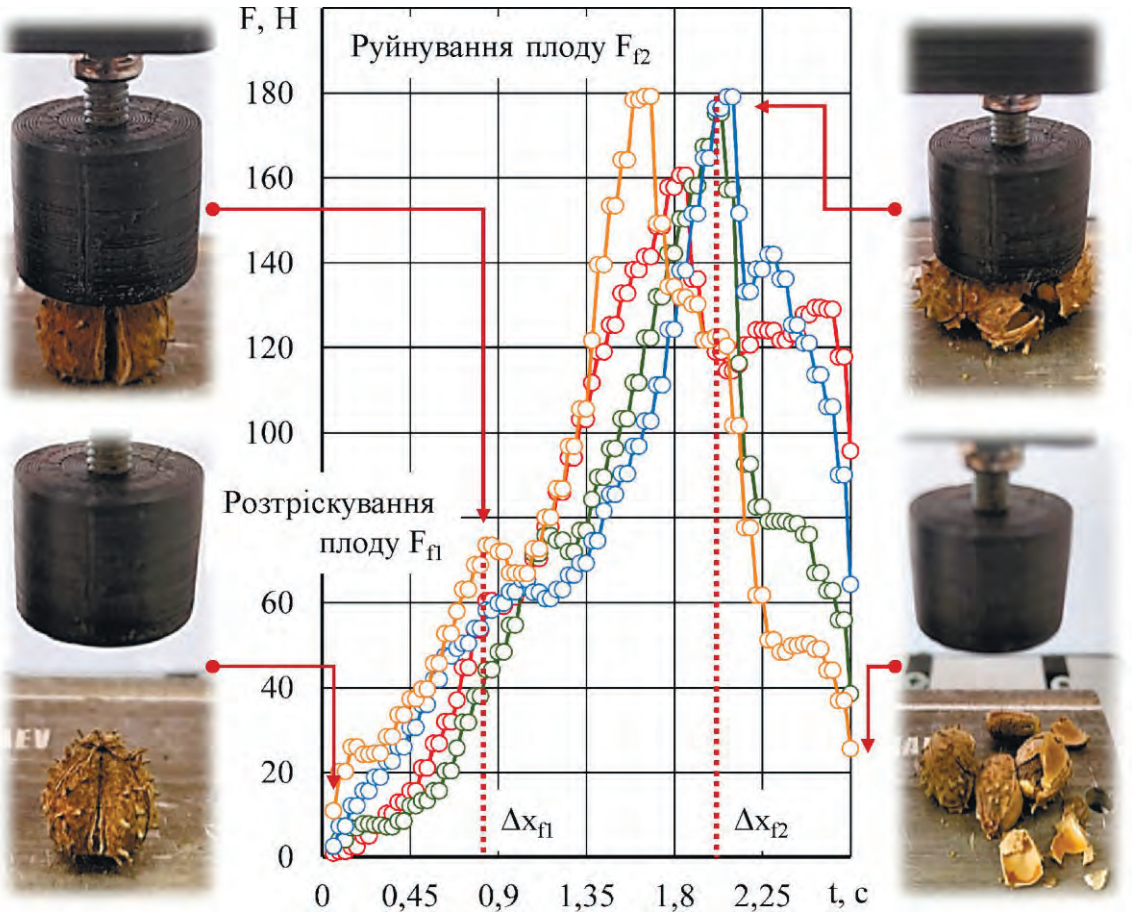


Рисунок 4.6 – Приклади залежностей сили F стиску плодів рицини від часу t

Аналіз характеру залежності сили F стиску плодів рицини від часу t дозволяє оцінити їх механічні властивості, зокрема пружність, пластичність і межу руйнування. На початковій стадії випробування сила F зростає лінійно, оскільки

відбувається пружна деформація оболонки плоду. У цей момент залежність сили від часу наближено описується лінійною функцією. Далі, зі збільшенням часу стискання, в момент коли сила набуває значення $F_{f1}(\Delta x_{f1})$ оболонка розтріскується. Після чого плід починає втрачати пружні властивості, деформація стає пластичною, і зростання сили сповільнюється. У цій зоні залежність може описуватися степеневою або експоненціальною функцією. При досягненні критичної сили $F_{f2}(\Delta x_{f2})$ оболонка руйнується, що супроводжується різким спадом сили. У цей момент на графіку F(t) спостерігається пік, після якого навантаження різко зменшується. Далі відбувається стискання внутрішньої частини плоду, а саме насіння (на рис. 4.6 не показано), і залежність сили від часу знову має лінійний характер, проте з меншим кутовим коефіцієнтом, оскільки насіння менш пружне за оболонку. Отже, характер залежності сили стиску плодів рицини від часу є нелінійним і включає кілька етапів: початкове лінійне зростання, момент розтріскування оболонки, уповільнення в зоні пластичної деформації, різкий спад при руйнуванні оболонки та подальше плавне зростання під час стискання насіння. Такий аналіз дозволяє оцінити механічні характеристики плодів, що є важливим для їх попередньої переробки, сортування та транспортування.

Аналіз характеру залежності сили F стиску насіння рицини від часу t дозволяє визначити його механічні властивості, зокрема пружність, пластичність і момент руйнування. На початковій стадії випробування сила F зростає лінійно, що відповідає пружній деформації насіння. У цей період залежність сили від часу наближено описується лінійною функцією, оскільки насіння чинить опір стисканню, поступово накопичуючи напруження. В момент накопичення критичного напруження (сила $F_{s2}(\Delta x_{s2})$) відбувається руйнування насінини і спостерігається різке зниження сили F. Після чого, зі збільшенням навантаження, насіння починає втрачати пружні властивості, і залежність сили від часу переходить у нелінійний режим, оскільки відбувається пластична деформація. У цей момент матеріал оболонки насіння поступово змінює свою структуру, що може бути описано степеневою або експоненціальною функцією. Таким чином, характер залежності сили стиску насіння рицини від часу включає кілька послідовних етапів: початкове

лінійне зростання сили під час пружної деформації, різкий спад після руйнування оболонки та подальше плавне збільшення сили. Такий аналіз є важливим для розуміння механічних властивостей насіння рицини, що має значення для процесів його переробки, сортування та транспортування.

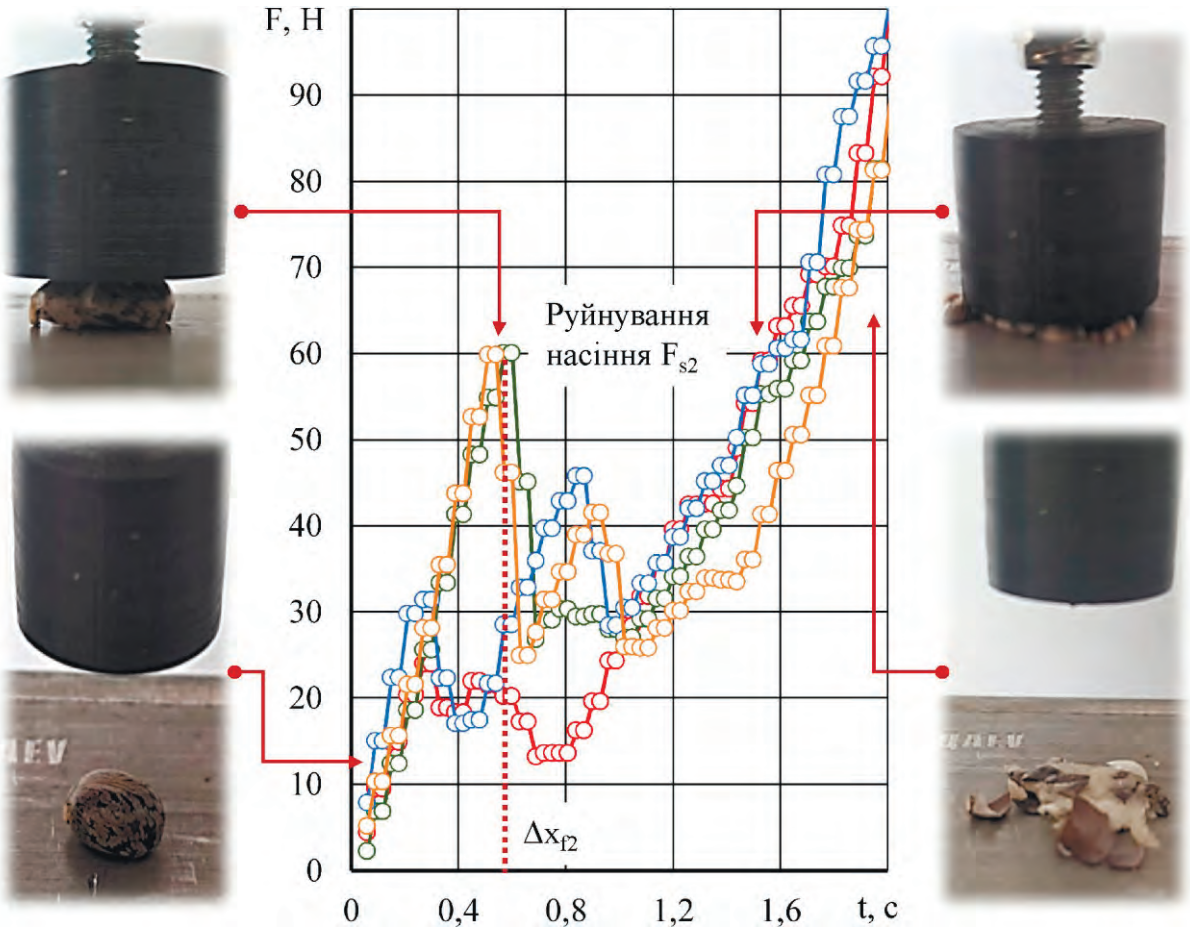


Рисунок 4.7 – Приклади залежностей сили F стиску насіння рицини від часу t

Гістограми розподілів фізичних величин F_{f1}, Δx_{f1}, F_{f2}, Δx_{f2}, F_{s2}, Δx_{s2} і відповідні криві нормального розподілу наведені на рис. 4.6. Зведені дані щодо статистичної обробки варіаційних рядів наведені в таблиці 4.2.

Аналіз результатів статистичної обробки варіаційних рядів розподілів сил і абсолютних деформацій, при яких спостерігається розтріскування і руйнування плодів та насіння рицини, показує високу узгодженість емпіричних даних із теоретичним законом нормального розподілу. Середні значення сил та деформацій,

при яких відбувається розтріскування та руйнування, мають низькі стандартні відхилення, що свідчить про відносно малу варіативність у структурних властивостях плодів і насіння рицини. Найменша сила руйнування спостерігається у насіння (F_{s2} = 48,91±8,34 Н), що підтверджує його менш міцну структуру порівняно з плодами (F_{f2} = 172,96±9,55 Н). Абсолютна деформація при руйнуванні також є найменшою у насіння (Δx_{s2} = 2,4±0,62 мм), що вказує на його меншу здатність до пластичних деформацій порівняно з плодами (Δx_{f2} = 7,19±0,79 мм). Розраховані значення критерію узгодженості χ^2 для всіх параметрів (від 7,6 до 14,5) є нижчими за табличне значення $\chi_{табл}^2$ = 16,9, що підтверджує відповідність експериментальних розподілів теоретичним із заданим рівнем значущості (0,05). Це свідчить про відсутність статистично значущих відхилень та про надійність отриманих даних. Коефіцієнти кореляції R для всіх параметрів знаходяться в межах від 0,787 до 0,929, що вказує на сильний зв’язок між силою та відповідною абсолютною деформацією. Найвищу кореляцію спостерігаємо для сили розтріскування плодів (R = 0,929), що вказує на високу передбачуваність поведінки оболонки при навантаженні. Дещо нижчі значення кореляції для сили руйнування насіння (R = 0,787) можуть бути пов’язані з більшою неоднорідністю внутрішньої структури насіння. Таким чином, отримані результати вказують на стабільність механічних характеристик плодів і насіння рицини та дозволяють точно прогнозувати їх поведінку при стисканні.

Таблиця 4.2 – Результати статистичної обробки варіаційних рядів розподілів сил і абсолютних деформацій при яких спостерігається розтріскування і руйнування плодів та насіння рицини

Показник	F_{f1}, Н	Δx_{f1}, мм	F_{f2}, Н	Δx_{f2}, мм	F_{s2}, Н	Δx_s, мм
Значення	63,67±3,52	3,32±0,75	172,96±9,55	7,19±0,79	48,91±8,34	2,4± 0,62
χ^2	7,6	14,5	13,2	8,0	9,7	7,8
R	0,929	0,870	0,860	0,855	0,787	0,796

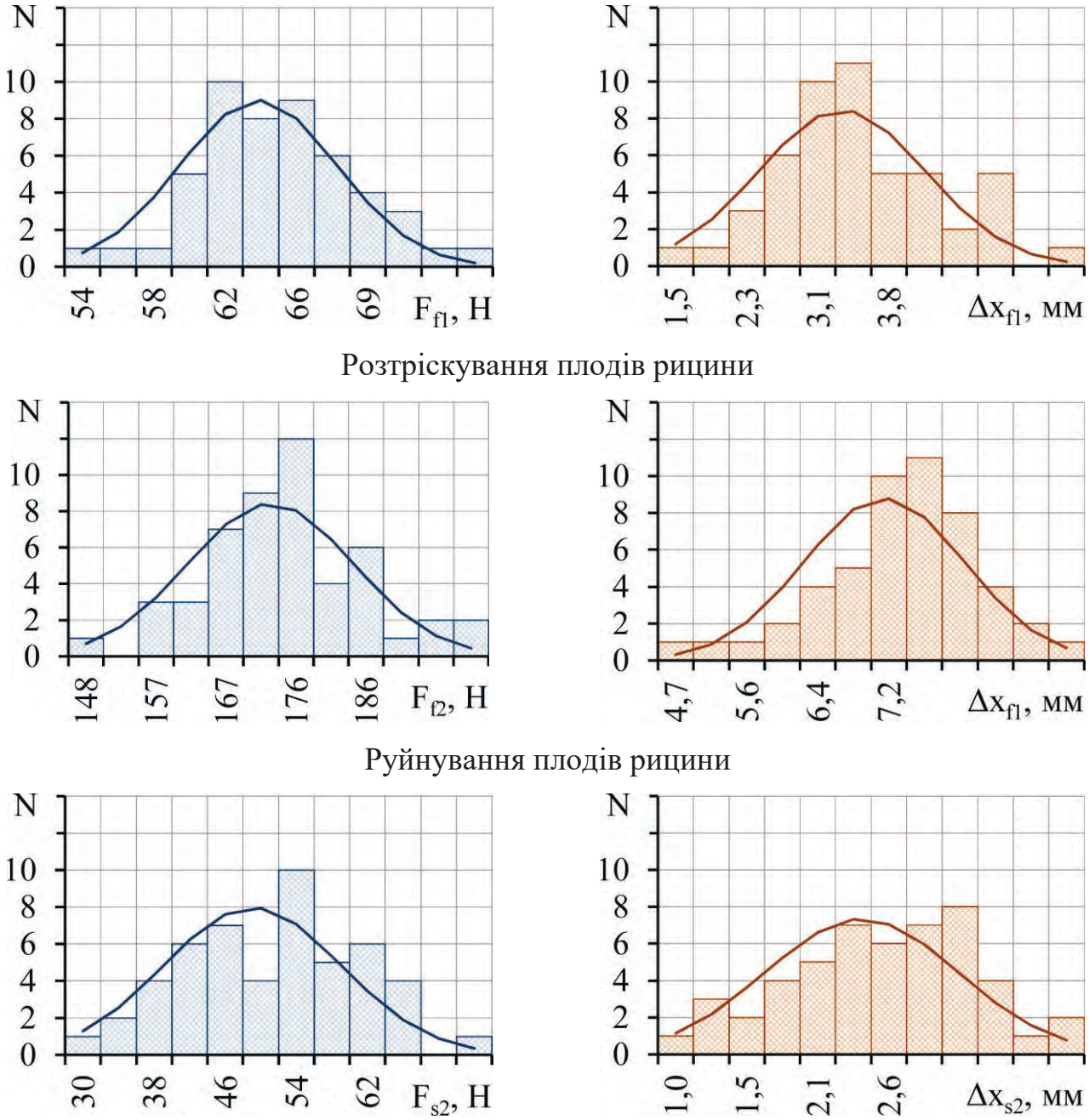


Рисунок 4.8 – Розподіли сил і абсолютних деформацій при яких спостерігається розтріскування і руйнування плодів та насіння рицини

Висока кореляція між силою та деформацією, а також підтвердження узгодженості розподілів за критерієм χ^2, свідчать про можливість використання цих характеристик для подальшої оптимізації технологічних процесів переробки та сортування.

4.2 Результати експериментальних досліджень процесу відокремлення і очищення насіння рицини

В результаті експериментальних досліджень отримані дані, які зведені в таблицю додатка В. Спираючись на наведену в розділі 3.5 методику статистичної обробки даних та програмному пакету Wolfram Cloud розраховані рівняння регресії другого порядку залежностей критерії досліджень від факторів (додатка В).

Рівняння регресії для продуктивності розробленої машини Q (кг/год) у закодованому форматі має вигляд:

$$Q = 162{,}801 + 38{,}0087\, x_1 - 5{,}68829\, x_1^2 + 9{,}01992\, x_2 + 2{,}00443\, x_1 x_2 - \\ - 22{,}4805\, x_2^2 + 2{,}0\, x_3 + 0{,}44444\, x_1 x_3 + 3{,}13\cdot 10^{-15}\, x_2 x_3 - 0{,}75\, x_3^2, \quad (4.1)$$

де x_1 – закодоване значення відстані між зворотнім і дробильним конусами δ; x_2 – закодоване значення частоти обертання дробильного конусу n; x_3 – закодоване значення швидкості повітряного потоку V.

Статистичний аналіз рівняння (4.1) наведений в таблиці 4.3. Провівши порівняння розрахованих значень t-статистики із табличним t(0,05;30) = 2,04, провівши при цьому відхилення не значущі коефіцієнти регресії і розкодувавши рівняння (4.1) остаточно маємо залежність продуктивності розробленої машини Q від факторів досліджень (рис. 4.9):

$$Q = -110{,}281 + 1{,}43903\, n - 0{,}00224805\, n^2 + 4{,}93852\, \delta - 0{,}0568829\, \delta^2. \quad (4.2)$$

Аналіз впливу частоти обертання дробильного конуса показує, що зі зростанням n продуктивність машини спочатку зростає, що зумовлено інтенсифікацією процесу руйнування плодів і ефективним виділенням насіння. Проте подальше збільшення частоти викликає зниження продуктивності через відкочування насіння від футеровки конусів в напрямку протилежному дії сили тяжіння. Максимальне значення продуктивності досягається при частоті обертання близько 641 об/хв, що відповідає фізично обґрунтованому компромісу між інтенсивністю обробки та траєкторією польоту насіння.

Таблиця 4.3 – Оцінка статистичної значущості коефіцієнтів регресії (4.1)

Позначення	Оцінка	Стандартна похибка	t-статистика	p-значення
b_{00}	162,801	2,28237	71,3295	$1{,}02575\cdot10^{-8}$
b_{10}	38,0087	1,39766	27,1944	$1{,}25786\cdot10^{-6}$
b_{20}	9,01992	1,39766	6,45357	0,00132923
b_{30}	2,0	1,39766	1,43096	0,21185
b_{12}	2,00443	1,97659	1,01408	0,357074
b_{13}	0,444444	1,97659	0,224854	0,830994
b_{23}	$3{,}13865\cdot10^{-15}$	1,97659	$1{,}58791\cdot10^{-15}$	1,0
b_{11}	–5,68829	2,0573	–2,76493	0,0396027
b_{22}	–22,4805	2,0573	–10,9272	0,000111575
b_{33}	–0,75	2,0573	–0,364555	0,730354

Позначення	DF	SS	MS	F-статистика
Модель	10	339988	33998,8	21755
Похибка	5	78,1384	15,6277	2,16

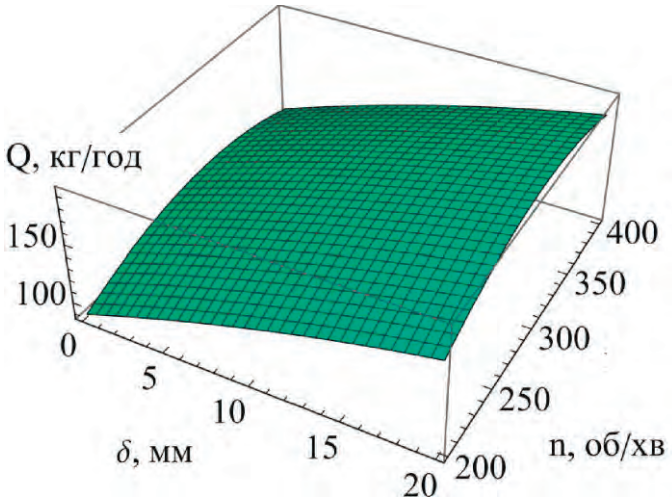


Рисунок 4.9 – Залежність продуктивності розробленої машини для очищення насіння рицини Q від відстані між зворотнім і дробильним конусами δ і частоти обертання дробильного конусу n

Аналогічно, залежність продуктивності від зазору між конусами також має параболічний характер. Зі зростанням зазору до певного значення підвищується пропускна здатність вузла, поліпшується подавання матеріалу та зменшується ймовірність заклинювання. Однак при надмірному збільшенні зазору насіння перестає ефективно вивільнятись із плодів, що призводить до зниження

продуктивності. Оптимальний зазор між конусами становить 20 мм, що забезпечує найвищу продуктивність.

Швидкість повітряного потоку V в зазначених діапазонах варіювання не впливає на продуктивність Q машини для очищення насіння рицини.

Рівняння регресії для потужності P (Вт), що споживається розробленою машиною у закодованому форматі має вигляд:

$$P = 1963{,}53 - 287{,}8\, x_1 - 16{,}6292\, x_1^2 + 236{,}425\, x_2 - 37{,}125\, x_1 x_2 + \\ + 28{,}3208\, x_2^2 + 184{,}95\, x_3 + 6{,}725\, x_1 x_3 + 1{,}525\, x_2 x_3 - 19{,}6292\, x_3^2. \quad (4.3)$$

Результати статистичного аналізу рівняння (4.3) представлено в таблиці 4.4. Порівняння обчислених значень t-критерію з табличним t(0,05;30) = 2,04 дозволило визначити статистично незначущі коефіцієнти регресії. Після зворотного перетворення (розкодування) рівняння (4.3) отримано остаточну аналітичну залежність потужності P, що споживається розробленою машиною від досліджуваних факторів, яка зображена на рисунку 4.10:

$$P = 1315{,}67 + 0{,}002832\, n^2 + 92{,}475\, V + 1{,}03625\, n - 0{,}037125\, \delta\, n - 17{,}6425\, \delta. \quad (4.4)$$

Аналізуючи цю залежність, можна стверджувати, що вона узгоджується з фізичними законами. Зокрема, квадратичний член $0{,}002832\, n^2$ свідчить про те, що зі збільшенням частоти обертання дробильного конуса споживана потужність зростає нелінійно, що відповідає зростанню кінетичної енергії та сил опору при подрібненні. Додатково присутній лінійний вплив обертів (1,03625 n), що пояснюється механічними втратами та збільшенням навантаження на привід при інтенсивнішій роботі вузла подрібнення.

Значний позитивний коефіцієнт при швидкості повітряного потоку (92,475 V) свідчить, що зі зростанням швидкості зростає енергоспоживання вентилятора, оскільки для переміщення більшого об'єму повітря потрібна більша потужність через зростання аеродинамічного опору.

Водночас наявність негативних коефіцієнтів при δ та δn (– 0,037125 δn – 17,6425 δ) свідчить, що збільшення зазору між дробильними конусами призводить до зменшення механічного навантаження, зменшуючи, відповідно, і споживану потужність. Причиною цього є зниження сили подрібнення та тертя при менш

інтенсивному контакті елементів. Взаємодія між зазором і частотою обертання показує, що ефект зменшення потужності підсилюється при вищих обертах.

Таблиця 4.4 – Оцінка статистичної значущості коефіцієнтів регресії (4.3)

Позначення	Оцінка	Стандартна похибка	t-статистика	p-значення
b_{00}	1963,53	12,2452	160,351	$1{,}78963\cdot10^{-10}$
b_{10}	– 287,8	7,49863	– 38,3804	$2{,}26259\cdot10^{-7}$
b_{20}	236,425	7,49863	31,5291	$6{,}02666\cdot10^{-7}$
b_{30}	184,95	7,49863	24,6645	$2{,}04325\cdot10^{-6}$
b_{12}	– 37,125	10,6047	– 3,50082	0,0172693
b_{13}	6,725	10,6047	0,634155	0,553855
b_{23}	1,525	10,6047	0,143805	0,891271
b_{11}	– 16,6292	11,0377	– 1,50658	0,192271
b_{22}	28,3208	11,0377	2,56583	0,0502891
b_{33}	– 19,6292	11,0377	– 1,77838	0,135478

Позначення	DF	SS	MS	F-статистика
Модель	10	$5{,}89778\cdot10^{7}$	$5{,}89778\cdot10^{6}$	13110,9
Похибка	5	2249,18	449,835	2,21

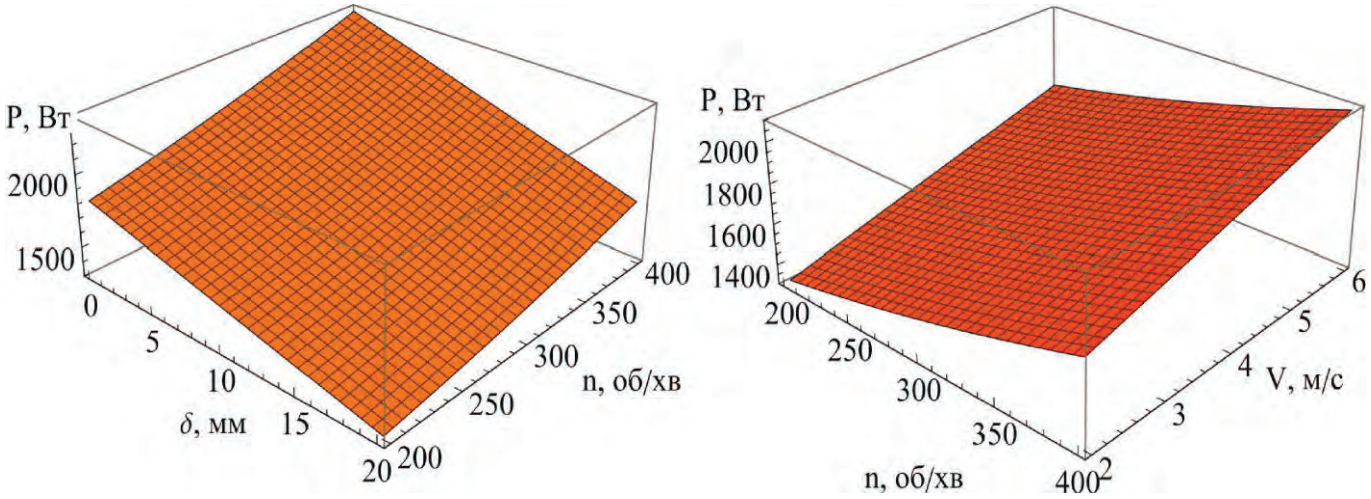


Рисунок 4.10 – Залежність потужності P, що споживається розробленою машиною для очищення насіння рицини від відстані між зворотнім і дробильним конусами δ, частоти обертання дробильного конусу n і швидкості повітряного потоку V

Таким чином, наведена модель дозволяє не лише оцінити енергоспоживання машини залежно від робочих параметрів, а й сприяє оптимізації технологічного режиму (δ = 20 мм, n = 200 об/хв, V = 2 м/с → P = 1319 Вт) з метою забезпечення енергоефективної роботи обладнання.

Рівняння регресії для питомих витрат електроенергії E (МДж/кг) розробленої машини у закодованому форматі має вигляд:

$$E = 0{,}0421371 - 0{,}0215043\, x_1 + 0{,}0079015\, x_1^2 + 0{,}00302159\, x_2 - 0{,}00137791\, x_1 x_2 + 0{,}0090958\, x_2^2 + 0{,}00388989\, x_3 - 0{,}000637263\, x_1 x_3 - 0{,}0000723159\, x_2 x_3 - 0{,}000467576\, x_3^2. \quad (4.5)$$

Статистичну обробку рівняння (4.5) представлено в таблиці 4.5. Порівняння розрахованих значень t-критерію з табличним значенням t(0,05;30) = 2,04 дало змогу виявити коефіцієнти регресії, які не є статистично значущими. Після виконання зворотного (натурального) перетворення рівняння (4.5) отримано кінцеву аналітичну залежність питомих витрат електроенергії E досліджуваної машини від факторів, що вивчалися (графічне зображення цієї залежності наведено на рисунку 4.11):

$$E = 0{,}132427 + 9{,}0958 \cdot 10^{-7}\, n^2 + 0{,}00194495\, V - 0{,}000501753\, n - 1{,}37791 \cdot 10^{-6}\, \delta\, n - 0{,}00331736\, \delta + 0{,}000079015\, \delta^2. \quad (4.6)$$

Позитивний коефіцієнт при квадратичному члені n^2 вказує на поступове зростання питомих витрат електроенергії зі збільшенням частоти обертання, що узгоджується з фізикою процесу, оскільки вищі оберти призводять до зростання механічного навантаження та відповідно підвищення енергоспоживання. Водночас негативний коефіцієнт при лінійному члені n частково компенсує цей вплив, що свідчить про можливість існування оптимального діапазону обертів, у якому витрати енергії мінімальні.

Швидкість повітряного потоку V позитивно впливає на значення питомих витрат, що пояснюється збільшенням енергії, необхідної для створення інтенсивнішого повітряного потоку за допомогою вентилятора.

Щодо параметра δ, спостерігається складна залежність: лінійний член із від’ємним коефіцієнтом свідчить про зниження питомих витрат електроенергії зі

збільшенням зазору між дробильними елементами, що зумовлено зменшенням інтенсивності подрібнення та зниженням навантаження на привід.

Таблиця 4.5 – Оцінка статистичної значущості коефіцієнтів регресії (4.5)

Позначення	Оцінка	Стандартна похибка	t-статистика	p-значення
b_{00}	0,0421371	0,00151944	27,732	$1{,}1412\cdot10^{-6}$
b_{10}	– 0,0215043	0,00093046	– 23,1115	$2{,}82158\cdot10^{-6}$
b_{20}	0,00302159	0,00093046	3,24741	0,0227612
b_{30}	0,00388989	0,00093046	4,18061	0,00864984
b_{12}	– 0,00137791	0,00131587	– 1,04715	0,342989
b_{13}	– 0,000637263	0,00131587	– 0,484291	0,648648
b_{23}	– 0,0000723159	0,00131587	– 0,0549568	0,958301
b_{11}	0,0079015	0,0013696	5,7692	0,0021988
b_{22}	0,0090958	0,0013696	6,64121	0,0011667
b_{33}	– 0,000467576	0,0013696	– 0,341396	0,746685

Позначення	DF	SS	MS	F-статистика
Модель	10	0,0433545	0,00433545	625,9
Похибка	5	0,0000346303	$6{,}92605\cdot10^{-6}$	2,27

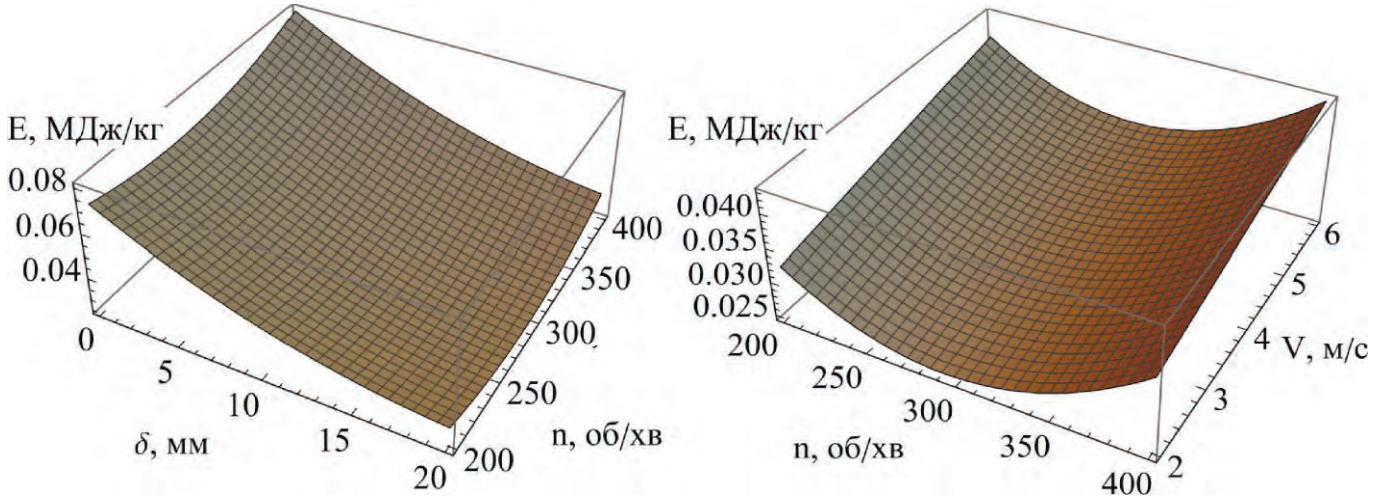


Рисунок 4.11 – Залежність питомих витрат електроенергії E розробленою машиною для очищення насіння рицини від відстані між зворотнім і дробильним конусами δ, частоти обертання дробильного конусу n і швидкості повітряного потоку V

Однак наявність доданка δ^2 з додатним коефіцієнтом вказує на те, що при надмірному збільшенні зазору витрати знову зростають, імовірно через зниження ефективності поділу плодів. Термін взаємодії δn з негативним коефіцієнтом свідчить про взаємозалежність цих двох параметрів: при одночасному зростанні частоти обертання і зазору питомі витрати електроенергії зменшуються, що свідчить про певний компенсуючий ефект.

Таким чином, рівняння описує складну, але логічно обґрунтовану залежність питомих витрат електроенергії від досліджуваних факторів і дозволяє визначити енергетично оптимальні режими роботи машини, за яких забезпечується ефективність очищення насіння при мінімальному споживанні електроенергії (E = 0,0246 МДж/кг → δ = 20 мм, n = 291 об/хв, V = 2 м/с).

Рівняння регресії для частки нерозлущених плодів (сегментів) ξ_f у закодованому форматі має вигляд:

$$\xi_f = 0{,}0948667 + 0{,}0598625\, x_1 - 0{,}0285208\, x_1^2 + 0{,}011725\, x_2 + \\ + 0{,}00925\, x_1 x_2 + 0{,}0613042\, x_2^2 - 0{,}0005\, x_3 - 0{,}000025\, x_1 x_3 + \\ + 0{,}000625\, x_2 x_3 + 0{,}00105417\, x_3^2. \qquad (4.7)$$

Результати статистичного аналізу рівняння (4.7) наведено в таблиці 4.6. Порівняння отриманих значень t-статистики з критичним значенням t(0,05;30) = 2,04 дало можливість визначити регресійні коефіцієнти, що не мають статистично значущого впливу. Провівши обернене (натуралізоване) перетворення рівняння (4.7), вдалося отримати остаточну формулу, яка описує залежність частки нерозлущених плодів (сегментів) ξ_f від досліджуваних факторів:

$$\xi_f = 0{,}550796 + 6{,}13042\cdot10^{-6}\, n^2 - 0{,}0036535\, n + 9{,}25\cdot10^{-6}\, \delta\, n + 0{,}00891542\, \delta - \\ - 0{,}000285208\, \delta^2. \qquad (4.8)$$

Графік залежності (4.8) представлено на рисунку 4.12

Частота обертання дробильного конусу n входить до рівняння в квадратичній формі (n^2) та лінійно. Квадратичний доданок з позитивним коефіцієнтом вказує, що надмірне збільшення обертів призводить до зростання частки нерозлущених плодів, ймовірно через зменшення часу контакту між плодами і дробильними елементами – насіння не встигає вивільнятися.

Таблиця 4.6 – Оцінка статистичної значущості коефіцієнтів регресії (4.8)

Позначення	Оцінка	Стандартна похибка	t-статистика	p-значення
b_{00}	0,0948667	0,000581545	163,129	$1{,}64239\cdot10^{-10}$
b_{10}	0,0598625	0,000356122	168,095	$1{,}41371\cdot10^{-10}$
b_{20}	0,011725	0,000356122	32,9241	$4{,}85793\cdot10^{-7}$
b_{30}	– 0,0005	0,000356122	– 1,40401	0,219277
b_{12}	0,00925	0,000503633	18,3666	$8{,}79971\cdot10^{-6}$
b_{13}	– 0,000025	0,000503633	– 0,0496394	0,962332
b_{23}	0,000625	0,000503633	1,24098	0,269659
b_{11}	– 0,0285208	0,000524197	– 54,4086	$3{,}9664\cdot10^{-8}$
b_{22}	0,0613042	0,000524197	116,949	$8{,}66939\cdot10^{-10}$
b_{33}	0,00105417	0,000524197	2,01101	0,100517

Позначення	DF	SS	MS	F-статистика
Модель	10	0,239341	0,0239341	23590
Похибка	5	$5{,}07292\cdot10^{-6}$	$1{,}01458\cdot10^{-6}$	2,21

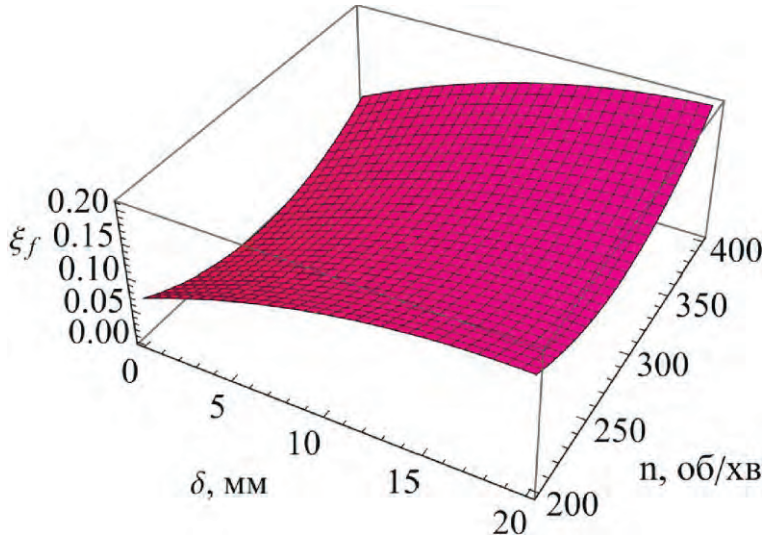


Рисунок 4.12 – Залежність частки нерозлущених плодів (сегментів) ξ_f від відстані між зворотнім і дробильним конусами δ, частоти обертання дробильного конусу n

Водночас лінійний доданок з від'ємним коефіцієнтом свідчить, що на початкових етапах підвищення частоти обертання відбувається зниження частки

нерозлущених плодів завдяки інтенсивнішому механічному впливу, що узгоджується з логікою дії дробильного механізму. Таким чином, ефект n є нелінійним і має оптимум.

Відстань між дробильними елементами δ представлена у рівнянні як у лінійній, так і в квадратичній формі. Позитивний коефіцієнт при δ свідчить про те, що зі збільшенням зазору між конусами кількість нерозлущених плодів зростає – зменшується ступінь подрібнення. Водночас від'ємний квадратичний доданок δ^2 вказує на нелінійність впливу і наявність деякого уповільнення темпу зростання ξ_f при надмірному збільшенні δ.

Суттєву роль відіграє також взаємодія між δ і n, відображена через доданок δ·n з позитивним коефіцієнтом, що вказує на погіршення ефективності розлущення за умови одночасного зростання зазору між дробильними елементами та частоти їх обертання. Це логічно, оскільки при великому зазорі навіть високі оберти не гарантують ефективного подрібнення. Швидкість повітряного потоку V не входить до рівняння, що підтверджує відсутність її прямого впливу на частку нерозлущених плодів, оскільки цей параметр стосується аеродинамічного очищення, а не стадії механічного розлущення.

Загалом, для мінімізації частки нерозлущених плодів (ξ_f = 0,006) необхідно оптимізувати поєднання (δ = 0 мм і n = 298 об/хв), оскільки їх вплив є взаємозалежним і нелінійним. Надмірне збільшення одного або обох параметрів веде до зниження ефективності процесу, що підтверджується фізичною суттю подрібнення плодів рицини.

Рівняння регресії для вмісту ліквідного насіння у забірнику насіння $\psi_{s\text{-}s}$ у закодованому форматі має вигляд:

$$\psi_{s\text{-}s} = 0{,}957362 + 0{,}047789\, x_1 - 0{,}0216417\, x_1^2 + 0{,}00649\, x_2 - 0{,}01909\, x_1 x_2 - 0{,}0166417\, x_2^2 + 0{,}005715\, x_3 + 0{,}0025\, x_1 x_3 + 7{,}87266\cdot 10^{-18}\, x_2 x_3 + 0{,}00270833\, x_3^2. \quad (4.9)$$

У таблиці 4.7 представлено результати статистичної обробки рівняння (4.9). Порівняння обчислених значень t-статистики з критичним значенням t(0,05;30) = 2,04 дало змогу ідентифікувати ті коефіцієнти регресії, вплив яких на

модель не є статистично достовірним. Після виконання зворотного (натуралізованого) перетворення рівняння (4.9) було отримано підсумковий вираз, що відображає залежність вмісту ліквідного насіння у забірнику $\psi_{s\text{-}s}$ від розглянутих факторів:

$$\psi_{s\text{-}s} = 0{,}66582 - 1.66417\cdot10^{-6}\, n^2 + 0{,}000677083\, V^2 + 0{,}0012543\, n - 0{,}00001909\, \delta\, n - 0{,}00380917\, V + 0{,}000125\, \delta\, V + 0{,}0143342\, \delta - 0{,}000216417\, \delta^2. \quad (4.10)$$

Графічне відображення залежності, описаної рівнянням (4.10), наведено на рисунку 4.13.

Таблиця 4.7 – Оцінка статистичної значущості коефіцієнтів регресії (4.9)

Позначення	Оцінка	Стандартна похибка	t-статистика	p-значення
b_{00}	0,957362	0,0017873	535,647	$4{,}30422\cdot10^{-13}$
b_{10}	0,047789	0,00109449	43,6631	$1{,}1893\cdot10^{-7}$
b_{20}	0,00649	0,00109449	5,92968	0,00194602
b_{30}	0,005715	0,00109449	5,22159	0,00340539
b_{12}	– 0,01909	0,00154785	– 12,3333	0,0000620585
b_{13}	0,0025	0,00154785	1,61515	0,1672
b_{23}	$7{,}87266\cdot10^{-18}$	0,00154785	$5{,}0862\cdot10^{-15}$	1,0
b_{11}	– 0,0216417	0,00161105	– 13,4333	0,0000409214
b_{22}	– 0,0166417	0,00161105	– 10,3297	0,000146291
b_{33}	0,00270833	0,00161105	1,6811	0,153574

Позначення	DF	SS	MS	F-статистика
Модель	10	13,2316	1,32316	138068
Похибка	5	0,0000479167	$9{,}58333\cdot10^{-6}$	2,42

У рівнянні (4.10) частота обертання дробильного конусу n впливає як у лінійному, так і в квадратичному вигляді: додатне значення при n і від'ємне при n^2 свідчить про наявність оптимального значення частоти, за якого досягається максимальний вміст ліквідного насіння. При низьких значеннях n розлущення плодів недостатнє, а при надто високих – інтенсивні удари спричиняють руйнування самого насіння, зменшуючи його ліквідність.

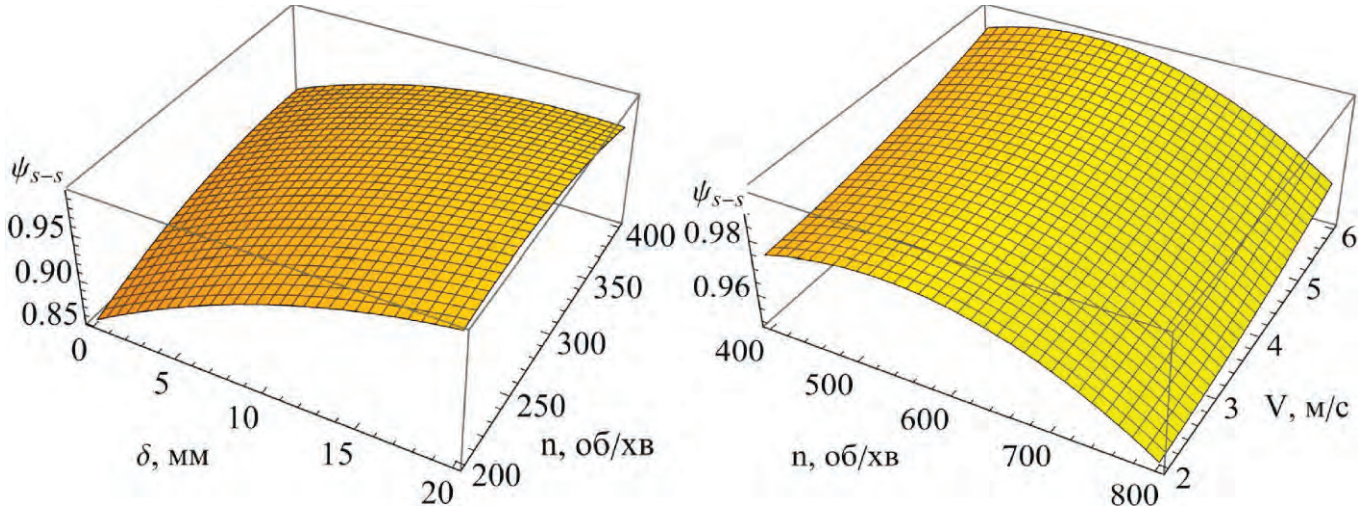


Рисунок 4.13 – Залежність вмісту ліквідного насіння у забірнику насіння ψ_{s-s} від відстані між зворотнім і дробильним конусами δ, частоти обертання дробильного конусу n і швидкості повітряного потоку V

Швидкість повітряного потоку V також проявляє подвійну дію: квадратичний додатний і лінійний від'ємний член свідчать про те, що за низьких значень швидкості ефективність сепарації недостатня, тоді як надмірно високий повітряний потік може виносити частину ліквідного насіння разом із легкими домішками. Це означає, що існує оптимальна швидкість V, яка забезпечує найкраще очищення без втрат цінного матеріалу.

Вплив відстані між зворотнім і дробильним конусами δ також має нелінійний характер: додатний лінійний, від'ємний квадратичний і комбіновані члени з n і V вказують на те, що занадто малий зазор між конусами спричиняє надмірне подрібнення насіння, а занадто великий – не забезпечує достатнього розлущення плодів. Найкращі результати досягаються при певному оптимальному значенні δ, яке забезпечує ефективне руйнування оболонок при мінімальному пошкодженні насіння. Комбіновані впливи δn і δV свідчать про взаємозалежність між механічними й пневматичними процесами у системі.

Загалом рівняння описує складну нелінійну взаємодію між дослідними факторами, що відображає фізичні процеси механічного руйнування оболонок

плодів, аеродинамічного поділу часток і збереження цілісності насіння. Це дозволяє зробити висновок, що для досягнення максимального вмісту ліквідного насіння необхідно забезпечити оптимальне поєднання швидкості повітряного потоку, частоти обертання дробильного конусу та відстані між робочими органами машини: $\psi_{s\text{-}s} = 0{,}982 \rightarrow \delta = 20$ мм, n = 262 об/хв, V = 6 м/с.

4.3 Оптимізація конструктивно-технологічних параметрів машини для очищення насіння рицини

Для оптимізації конструктивно-технологічних параметрів машини для очищення насіння рицини скористаємося умовою мінімізації питомих енерговитрат і частки нерозлущених плодів (сегментів) при високому вмісту ліквідного насіння у забірнику насіння:

$$\begin{cases} E(\delta, n, V) \rightarrow \min, \\ \xi_f(\delta, n, V) \rightarrow \min, \\ \psi_{s-s}(\delta, n, V) \rightarrow \max. \end{cases} \tag{4.11}$$

Використовуючи Wolfram Cloud і метод мінімізації мультиплікативної функції комплексу критеріїв, отриманої шляхом скалярного ранжування, проведено один із ефективних підходів до багатокритеріальної оптимізації. Цей підхід дозволяє знайти найкраще поєднання значень факторів для досягнення оптимального результату одночасно за кількома критеріями. Його суть полягає у зведенні багатокритеріальної задачі до однокритеріальної шляхом побудови так званої мультиплікативної цільової функції, що відображає взаємозв’язок між усіма критеріями. У випадках, коли необхідно одночасно оптимізувати декілька функцій (наприклад, мінімізувати питомі витрати енергії, кількість нерозлущених плодів і максимізувати вміст ліквідного насіння), замість окремої оптимізації кожного критерію застосовується єдина агрегована функція у вигляді добутку відносних значень кожного з критеріїв, нормалізованих на бажані або оптимальні значення, із урахуванням їх вагомості. Загальний вигляд мультиплікативної функції має форму:

$$K = \frac{E(\delta, n, V) - E^{min}}{E^{max} - E^{min}} \frac{\xi_f(\delta, n, V) - \xi_f^{min}}{\xi_f^{max} - \xi_f^{min}} \frac{\psi_{s-s}^{max} - \psi_{s-s}(\delta, n, V)}{\psi_{s-s}^{max} - \psi_{s-s}^{min}} \rightarrow \min. \quad (4.12)$$

Вирішуючи рівняння (4.12) спільно з (4.6), (4.8) і (4.10) отримані раціональні значення конструктивно-технологічних параметрів машини для очищення насіння рицини: δ = 10,8 мм; n = 282 об/хв; V = 3,6 м/с → E = 0,0394 МДж/кг; Q =163,4 кг/год; P = 1861 Вт; ξ_f = 0,099; ψ_{s-s} = 0,958.

4.4 Порівняння результатів експериментальних досліджень і чисельного моделювання

Порівняння результатів чисельного моделювання і експериментальних досліджень процесу відокремлення і очищення насіння рицини проведено для трьох основних показників ефективності роботи машини: продуктивності Q, частки нерозлущених плодів ξ_f та вмісту ліквідного насіння у забірнику ψ_{s-s}. Порівняння виконано при фіксованих оптимальних значеннях факторів: відстані між зворотнім і дробильним конусами δ = 10,8 мм, частоти обертання дробильного конуса n = 282 об/хв, діаметра отвору подачі D_{in} = 98 мм, кута нахилу осі дробильного конусу γ 3,6°, кута нахилу решета β = 20,3° та швидкості повітряного потоку V = 3,6 м/с.

За результатами чисельного моделювання (2.28) продуктивність машини визначається комплексною залежністю від діаметра отвору подачі, частоти обертання дробильного конусу, кута нахилу осі дробильного конуса, відстані між зворотним і дробильним конусами, а також їх квадратичних і комбінованих членів, що дозволяє описати складний багатофакторний характер процесу. Експериментальні дослідження (4.2) показали, що основними впливовими факторами на продуктивність є частота обертання дробильного конусу та відстань між зворотним і дробильним конусами, причому квадратичні члени в рівнянні свідчать про наявність оптимальних значень цих параметрів. Графічне порівняння залежностей (2.28) і (4.2) наведено на рис. 4.14, при цьому коефіцієнт кореляції між результатами чисельного моделювання і експерименту складає 0,89.

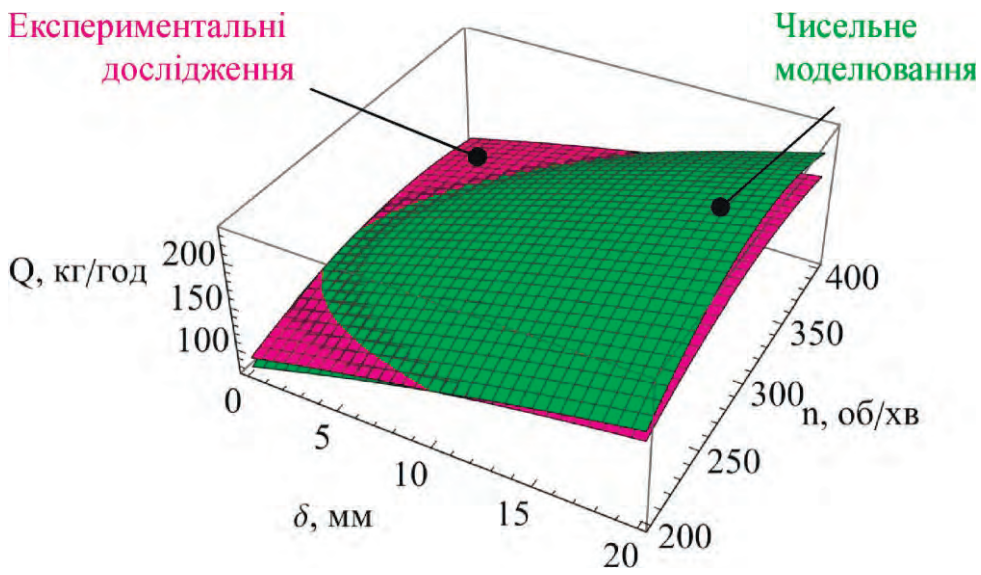


Рисунок 4.14 – Залежність продуктивності розробленої машини для очищення насіння рицини Q від відстані між зворотнім і дробильним конусами δ і частоти обертання дробильного конусу n

Аналогічна ситуація спостерігається при порівнянні моделей для частки нерозлущених плодів ξ_f. Чисельне моделювання (2.30) передбачає залежність цієї величини від діаметра отвору подачі, частоти обертання дробильного конусу, кута нахилу осі дробильного конусу, відстані між зворотнім і дробильним конусами та їх взаємодії. Експериментальна модель (4.8) є спрощеною та враховує вплив частоти обертання, відстані між зворотнім і дробильним конусами та їх парних комбінацій, проте вона також демонструє тенденцію до зменшення частки нерозлущених плодів при оптимальному підборі параметрів. Графічне порівняння залежностей (2.30) і (4.8) наведено на рис. 4.15, при цьому коефіцієнт кореляції між результатами чисельного моделювання і експерименту складає 0,85.

У моделі вмісту ліквідного насіння у забірнику $\psi_{s\text{-}s}$ чисельне моделювання (2.34) показує залежність від продуктивності, швидкості повітряного потоку та кута нахилу решета, при цьому враховано квадратичні ефекти, що відповідає фізичній суті процесу. Експериментальні дані (4.10) дають більш деталізовану залежність, яка включає додаткові парні взаємодії між частотою обертання, відстані між зворотнім і дробильним конусами та швидкістю повітряного потоку, що дозволяє краще

описати реальні умови роботи машини. Обидві моделі демонструють характерну для процесу очищення нелінійну залежність, коли підвищення параметрів до певного рівня покращує результат, але перевищення оптимальних значень призводить до погіршення показників за рахунок пошкодження ліквідного насіння або втрати ефективності відокремлення. Графічне порівняння залежностей (2.34) і (4.10) наведено на рис. 4.16, при цьому коефіцієнт кореляції між результатами чисельного моделювання і експерименту складає 0,78.

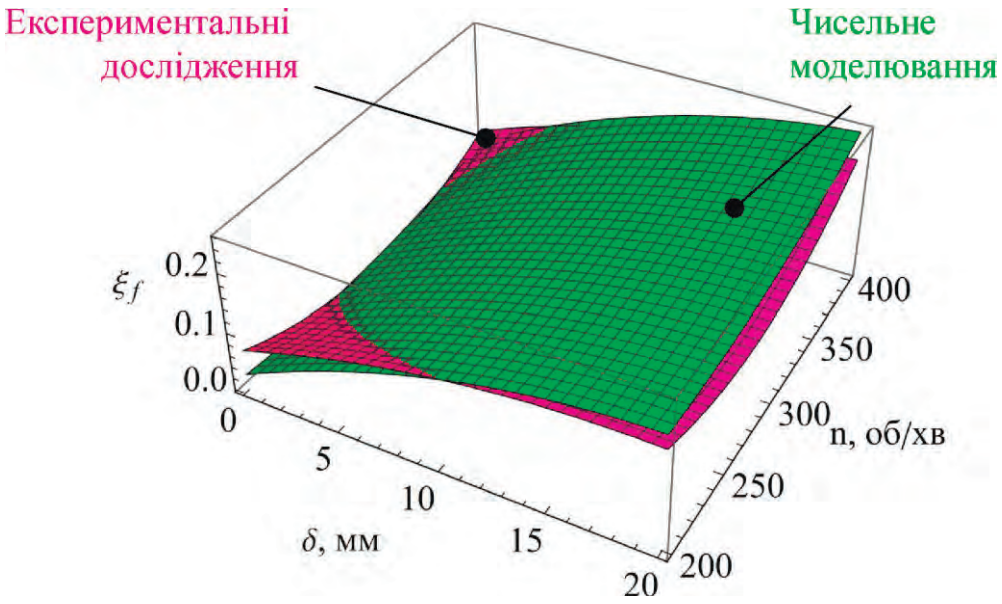


Рисунок 4.15 – Залежність частки нерозлущених плодів (сегментів) ξ_f від відстані між зворотнім і дробильним конусами δ і частоти обертання дробильного конусу n

Загалом результати порівняння показали, що чисельне моделювання добре узгоджується з експериментальними даними за основними тенденціями впливу конструктивних та режимних параметрів на показники роботи машини. Чисельні моделі є більш повними та враховують ширший спектр факторів, тоді як експериментальні моделі мають спрощений вигляд, але підтверджують основні закономірності процесу. Це свідчить про адекватність розроблених математичних моделей та їх придатність для прогнозування роботи машини і подальшої оптимізації процесу відокремлення і очищення насіння рицини.

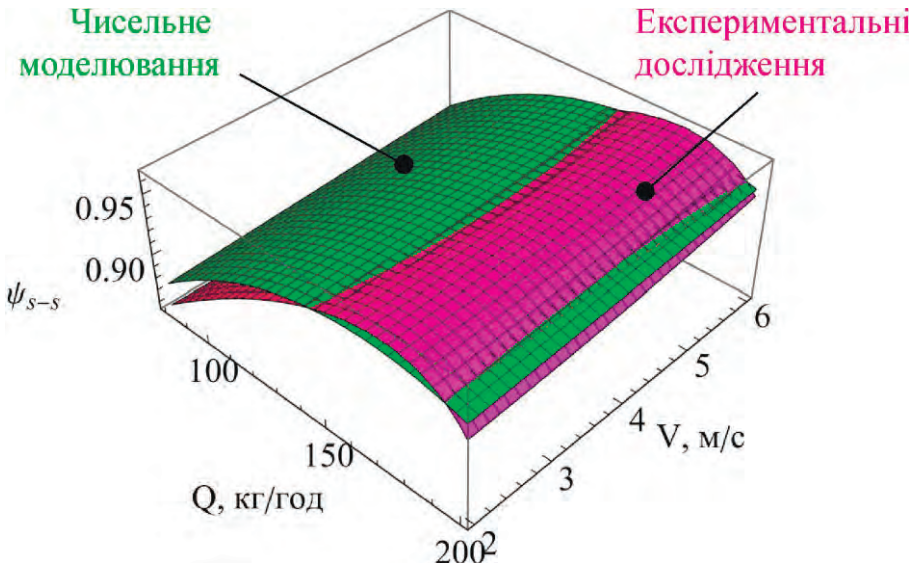


Рисунок 4.16 – Залежність вмісту ліквідного насіння у забірнику насіння ψ_{s-s} від подачі (продуктивність відокремлення насіння) Q і швидкості повітряного потоку V

4.5 Висновки до розділу

1. В результаті лабораторних досліджень на спеціалізованому обладнанні встановлено основні фізико-механічні властивості плодів рицини та їх складових (сегментів, насіння і частинок коробочки), зокрема геометричні розміри (довжина L та ширина B), масу M, насипну ρ_b та дійсну ρ_d щільність, кут природного укосу φ, коефіцієнти тертя (ковзання $\mu`$ та спокою μ) та швидкість витання V. Виявлено, що насіння має найвищу дійсну щільність (567 ± 54 кг/м³) і найнижчі коефіцієнти тертя, що забезпечує його кращу сипучість і рухливість у технологічних процесах. Плоди характеризуються найбільшою масою (1,18 ± 0,13 г) і швидкістю витання (11,75 ± 1,43 м/с), що впливає на методи їх очищення та сортування. Частинки коробочки мають найменшу щільність (101 ± 17 кг/м³) і найнижчу швидкість витання (3,21 ± 0,51 м/с), що дозволяє ефективно їх відокремлювати аеродинамічними методами. Отримані результати використані під час чисельного моделювання машини для очищення насіння рицини.

2. Дослідження реологічних властивостей плодів і насіння рицини показало, що їх механічна поведінка при стисканні має виражену нелінійну залежність від

часу та абсолютної деформації. Аналіз отриманих залежностей сили стиску F від часу t (абсолютної деформації Δx) свідчить, що процес деформації плодів рицини включає кілька послідовних етапів: початкове лінійне зростання сили в межах пружної деформації, момент розтріскування оболонки (F_{f1} = 63,67 ± 3,52 Н, Δx_{f1} = 3,32 ± 0,75 мм), уповільнення росту сили у фазі пластичної деформації, різкий спад при руйнуванні оболонки (F_{f2} = 172,96 ± 9,55 Н, Δx_{f2} = 7,19 ± 0,79 мм) та подальше плавне зростання сили під час стискання внутрішньої частини плоду. Подібний характер деформації спостерігається і для насіння рицини, однак момент руйнування (F_{s2} = 48,91 ± 8,34 Н, Δx_{s2} = 2,4 ± 0,62 мм) супроводжується різким зниженням сили без вираженої стадії пластичної деформації. Статистична обробка експериментальних даних підтвердила відповідність розподілів сил і деформацій нормальному закону розподілу.

3. В результаті експериментальних досліджень процесу відокремлення і очищення насіння рицини отримані залежності продуктивності розробленої машини Q (4.2), споживаної потужності P (4.4), питомих витрат електроенергії E (4.6), частки нерозлущених плодів (сегментів) ξ_f (4.8), вмісту ліквідного насіння у забірнику $\psi_{s\text{-}s}$ (4.10) від відстані між зворотнім і дробильним конусами δ, частоти обертання дробильного конусу n і швидкості повітряного потоку V. Проведений статистичний аналіз регресійних рівнянь дозволив визначити вплив кожного з досліджуваних факторів на цільові показники роботи машини, виявити значущі параметри та побудувати адекватні аналітичні моделі.

4. Застосування методу скалярного ранжування з мінімізацією мультиплікативної функції в середовищі Wolfram Cloud дало змогу встановити оптимальні поєднання значень факторів (δ = 10,8 мм; n = 282 об/хв; V = 3,6 м/с), які забезпечують максимальну ефективність процесу, з урахуванням сукупності технологічних (якісних) і енергетичних критеріїв (E = 0,0394 МДж/кг; Q =163,4 кг/год; P = 1861 Вт; ξ_f = 0,099; $\psi_{s\text{-}s}$ = 0,958). Отримані результати підтверджують доцільність подальшого впровадження запропонованої конструкції машини для очищення насіння рицини у виробничу практику.

5. Порівняння результатів чисельного моделювання та експериментальних

досліджень процесу відокремлення і очищення насіння рицини показало задовільну узгодженість за основними показниками роботи машини: продуктивністю Q, часткою нерозлущених плодів ξ_f та вмістом ліквідного насіння у забірнику $\psi_{s\text{-}s}$. Для продуктивності коефіцієнт кореляції між чисельною та експериментальною моделями склав 0,89, для частки нерозлущених плодів – 0,85, для вмісту ліквідного насіння – 0,78. Чисельні моделі враховують ширший спектр факторів, що дозволяє детальніше описати процес, тоді як експериментальні залежності спрощені, але підтверджують основні закономірності. Отримані результати свідчать про адекватність розроблених математичних моделей та їх придатність для прогнозування роботи машини і оптимізації процесу очищення насіння рицини.

Основні наукові результати розділу опубліковано в працях автора [171, 189, 190, 191, 192, 193].

5 РЕАЛІЗАЦІЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕНЬ

5.1 Впровадження результатів досліджень

Результати дисертаційних досліджень, присвячених обґрунтуванню конструктивно-технологічних параметрів машини для очищення насіння рицини, пройшли апробацію та впровадження у виробничій, науково-дослідній і навчальній сферах, що підтверджено відповідними актами впровадження.

Виробниче впровадження результатів досліджень здійснено на підприємстві ***ТОВ ВО «Восход»*** (додаток Г), де використано науково-технічні напрацювання, отримані в межах виконання наукової роботи БМ-27/2025 «Інтенсифікація техніко-технологічного забезпечення процесів переробки насіння малопоширених (нішевих) олійних культур» (№ ДР 0125U000488). Підприємству передано комплект технічної та конструкторської документації на експериментальний зразок машини для очищення насіння рицини. За результатами ознайомлення та попередньої оцінки технічних рішень підприємством підтверджено зацікавленість у виготовленні дослідної партії машин у кількості п’яти одиниць з метою проведення виробничих випробувань і подальшої підготовки до серійного виробництва. Це свідчить про практичну придатність і промислову перспективність розробленої конструкції.

Науково-дослідне впровадження результатів здійснено в ***Інституті олійних культур НААН України*** (додаток Г), де проведено комплекс лабораторних і напівпромислових випробувань дослідного зразка машини під час очищення насіння рицини сорту Хортицька 3. У процесі досліджень отримано аналітичні, чисельні та експериментальні залежності основних показників роботи машини – продуктивності, споживаної потужності, питомих витрат електроенергії, частки нерозлущених плодів і вмісту ліквідного насіння – від конструктивно-режимних параметрів. За результатами випробувань встановлено оптимальні значення параметрів, що забезпечують високу ефективність процесу очищення з урахуванням технологічних та енергетичних критеріїв. Отримані результати підтвердили доцільність застосування розробленої машини у виробничій практиці та були

рекомендовані для використання при удосконаленні технологічних схем післязбиральної доробки насіння нішевих олійних культур, а також у подальших наукових дослідженнях.

Практичну перевірку працездатності машини здійснено в умовах діючого сільськогосподарського підприємства ***СФГ «Зоря»*** (додаток Г). Під час виробничої перевірки експериментальний зразок машини використовувався для очищення партії післязбиральної рицини масою 630 кг з вологістю 7–8 % і засміченістю, характерною для виробничих умов. Машина працювала у безперервному режимі з регулюванням основних параметрів відповідно до програми випробувань. Отримані показники – продуктивність близько 170 кг/год, споживана потужність близько 1,9 кВт, частка нерозлущених плодів на рівні 0,12 і втрати ліквідного насіння близько 0,05 – підтвердили ефективність, стабільність роботи та технологічну доцільність запропонованої конструкції в реальних виробничих умовах.

Результати дисертаційної роботи також впроваджено у ***навчальний процес Дніпровського державного аграрно-економічного університету*** (додаток Г) на кафедрі тракторів і сільськогосподарських машин. На основі виконаних досліджень удосконалено навчальні матеріали дисципліни «Сільськогосподарські машини» для студентів освітнього рівня бакалавр за спеціальністю 208 (Н7) «Агроінженерія». У навчальний процес впроваджено практичні заняття з використанням дослідної установки для очищення насіння рицини, методики лабораторних і напівпольових випробувань, а також елементи аналізу конструктивно-технологічних параметрів і регресійних моделей для визначення раціональних режимів роботи машин. Це сприяло підвищенню якості практичної підготовки здобувачів освіти та формуванню навичок застосування наукових методів в інженерній діяльності.

Таким чином, результати дисертаційних досліджень пройшли всебічну апробацію та впровадження у виробництві, науково-дослідній діяльності та навчальному процесі, що підтверджує їх наукову обґрунтованість, практичну значущість і готовність до подальшого використання та комерціалізації.

5.2 Визначення економічної ефективності машини для очищення насіння рицини

У зв'язку з відсутністю в Україні вітчизняного обладнання для розлущування плодів і очищення насіння рицини, як базовий варіант для порівняльного аналізу прийнято технологічну систему, що складається з двох машин: установки для розлущування плодів Lerford Machine LLC RX-200 (виробництво Китай) та машини для очищення насіння СС-1 (ТОВ НВО «Сортувальні машини», Україна). Як альтернативу запропоновано розроблену машину для очищення насіння рицини, яка забезпечує виконання технологічного процесу в одному агрегаті. Технічні характеристики досліджуваного обладнання наведено в таблиці 5.1.

Таблиця 5.1 – Технічна характеристика обладнання для очищення насіння рицини

Характеристика	Розроблений варіант	Базовий варіант	
	Розроблена машина для очищення насіння рицини	Lerford Machine LLC RX-200	СС-1 (ТОВ НВО «Сортувальні машини»)
Фото			
Продуктивність, кг/год	170	200 [194]	133 [164]
Споживана потужність, кВт	1,9	2,2 [194]	0,2 [164]
Частка нерозлущених плодів	0,12	0,19 [103]	–
Втрати ліквідного насіння	0,05	–	0,07 [164]
Кількість операторів	1	1	1
Балансова вартість, грн	220000	38000	150000

Для проведення економічних розрахунків використано вихідні дані, наведені в таблиці 5.2. У розрахунках враховано вартість електроенергії, оплату праці оператора, вартість насіння рицини, нормативні коефіцієнти амортизаційних відрахувань, а

також витрати на технічне обслуговування і ремонт. Загальний обсяг перероблюваних плодів прийнято на рівні 2000 кг, що відповідає умовам виробничої перевірки.

Таблиця 5.2 – Вихідні дані для економічних розрахунків

Показник	Значення
Вартість 1 кВт електроенергії, грн	8,25
Тарифна ставка оператора за 1 год., грн	100
Вартість 1 т насіння рицини, грн	400
Коефіцієнт амортизаційних відрахувань	0,15
Коефіцієнт відрахувань на технічне обслуговування і ремонт	0,15
Загальний обсяг плодів насіння, кг	2000

Результати економічних розрахунків за стандартними методиками [195, 196, 197] подано в таблиці 5.3. Аналіз показує, що розроблений варіант забезпечує зниження загальних питомих витрат до 50,564 грн/кг, тоді як для базової системи сумарні питомі витрати становлять 56,916 грн/кг. Основний економічний ефект досягається за рахунок зменшення втрат ліквідного насіння та скорочення витрат на оплату праці, оскільки технологічний процес виконується однією машиною замість двох. Питомий економічний ефект від використання розробленої машини становить 6,351 грн/кг переробленої сировини.

Таблиця 5.3 – Результати економічних розрахунків

Характеристика	Розроблений варіант	Базовий варіант		
	Розроблена машина	LLC RX-200	CC-1	Всього
Час роботи, год	13,2	11,9	17,9	–
Питомі витрати на електроенергію, грн/кг	0,103	0,108	0,015	0,123
Питомі витрати на оплату праці, грн/кг	0,461	0,417	0,626	1,043
Питомі витрати на амортизацію, грн/кг	15,000	2,625	11,250	13,875
Питомі витрати на ТО і ремонт, грн/кг	15,000	2,625	11,250	13,875
Питомі втрати ліквідного насіння, грн/кг	20,000	–	28,000	28,000
Загальні питомі витрати, грн/кг	50,564	5,774	51,141	56,916
Питомий економічний ефект, грн/кг	6,351	–	–	–
Строк окупності, рік	1,181	–	–	–

Розрахований строк окупності капітальних вкладень у розроблений варіант дорівнює 1,18 року, що свідчить про доцільність його впровадження у виробничих умовах. Отже, результати техніко-економічного аналізу підтверджують конкурентоспроможність і економічну ефективність розробленої машини для очищення насіння рицини порівняно з існуючим базовим варіантом.

5.3Висновки з розділу

1. Результати досліджень з обґрунтування конструктивно-технологічних параметрів машини для очищення насіння рицини пройшли комплексну апробацію та впровадження у виробничій, науково-дослідній і навчальній сферах, що підтверджує їх наукову обґрунтованість і практичну цінність. Виробничі та напівпромислові випробування засвідчили працездатність, стабільність і ефективність запропонованої конструкції в реальних умовах експлуатації, а отримані експериментальні результати дали змогу визначити раціональні параметри роботи машини. Зацікавленість промислового підприємства у виготовленні дослідної партії машин, рекомендації наукової установи щодо впровадження результатів у технологічні схеми післязбиральної доробки насіння, а також використання напрацювань у навчальному процесі свідчать про практичну придатність, промислову перспективність і готовність розробки до подальшого впровадження та комерціалізації.

2. Проведене техніко-економічне оцінювання показало, що розроблена машина для очищення насіння рицини, яка поєднує в одному агрегаті операції розлущування плодів і очищення насіння, є економічно доцільною та конкурентоспроможною порівняно з базовою системою з двох машин (Lerford Machine LLC RX-200 та СС-1 ТОВ НВО «Сортувальні машини»). Незважаючи на вищу балансову вартість, розроблений варіант забезпечує зниження загальних питомих витрат з 56,916 до 50,564 грн/кг за рахунок зменшення втрат ліквідного насіння та скорочення витрат на оплату праці. Питомий економічний ефект становить 6,351 грн/кг переробленої сировини, а строк окупності капітальних вкладень дорівнює 1,18 року, що підтверджує доцільність впровадження розробленої машини у виробничих умовах.

ВИСНОВКИ

В роботі вирішена науково-технічна задача підвищення ефективності відокремлення і очищення насінин рицини шляхом обґрунтування технологічного процесу, параметрів і режимів роботи сепаратора-очисника на основі їх реологічних особливостей. За результатами досліджень зроблено наступні висновки:

1. Рицина є перспективною біоенергетичною та промисловою культурою з високим потенціалом для сталого розвитку аграрного сектору України, однак її ефективне впровадження стримується недостатнім рівнем механізації та науково-технічного забезпечення післязбиральної обробки. Аналіз фізико-механічних властивостей плодів і насіння, технологій збирання та існуючих машин показав необхідність застосування спеціалізованого регульованого обладнання, здатного враховувати варіативність морфологічних характеристик і мінімізувати пошкодження насіння. Обґрунтовано доцільність використання комбінованих технологій розлущування та очищення з аеродинамічною і решітною сепарацією, а також підтверджено перспективність поєднання експериментальних і чисельних методів моделювання (DEM–CFD) для оптимізації конструктивно-технологічних параметрів машин. Запропонована технологічна схема машини для очищення насіння рицини створює науково-інженерну основу для подальшої розробки, впровадження у виробництво та підвищення економічної й технологічної ефективності переробки рицини.

2. Запропонована конструкція машини для очищення насіння рицини дає змогу забезпечити комплексну післяжнивну переробку плодів рицини шляхом ефективного розлущування коробочок, відокремлення насіння та високоякісного очищення отриманого вороху від легких домішок, пилу та частинок коробочок. Завдяки поєднанню механічного подрібнення з системою аеродинамічного очищення досягається підвищення якості продукції та зменшення втрат насіння. Автоматизоване регулювання положення зворотного конусу за допомогою мотор-редуктора підвищує точність налаштувань і стабільність технологічного процесу. Додаткове оснащення машини блоком керування забезпечує автоматизацію окремих

функціональних вузлів, поліпшує умови експлуатації, підвищує надійність роботи та зменшує вплив людського фактора під час роботи машини.

3. Для глибшого розуміння процесів руйнування плодів рицини і переміщення компонентів отриманої суміші доцільно застосувати метод дискретних елементів (DEM) у Simcenter Star-CCM+. DEM дозволяє моделювати рух і взаємодію частинок без припущень про континуум, відтворюючи відповідні мікроскопічні механізми. Плоди і насіння рицини моделювались, як скупчення сферичних частинок, рух яких розраховується за рівняннями Ньютона з урахуванням контактних сил і моментів, описаних моделями Герца-Міндліна, обертального тертя з постійним напрямком моменту (CDT) та спрощеною моделлю когезії Джонсона-Кендалла-Робертса (SJKR). Чисельне моделювання процесу руйнування плодів і насіння рицини під дією стискаючого навантаження, виконане на основі схеми (рис. 2.4) з урахуванням фізико-механічних і реологічних властивостей біоматеріалу, дозволило детально проаналізувати етапи деформації та руйнування цих об’єктів. Встановлено, що руйнування має багатофазну природу і включає три основні стадії: пружну деформацію, втрату структурної цілісності (з утворенням тріщин і фрагментацією) та ущільнення залишків. Для плодів рицини характерне поступове зростання сили до пікового значення, плато та різке зменшення опору після руйнування, тоді як насіння демонструє різкий спад сили після досягнення критичного навантаження з подальшим її відновленням через ущільнення залишків. Залежності сили стиску від часу, отримані в результаті чисельного моделювання (рис. 2.5–2.6), повністю узгоджуються з даними лабораторних випробувань (рис. 4.6–4.7), що підтверджує достовірність моделі та обґрунтовує її застосування для подальшого оптимізаційного аналізу й проєктування конструктивно-технологічних параметрів машин для очищення насіння рицини.

4. Створена математична модель (2.10)–(2.26), з використанням якої обґрунтувано розміри робочої зони машини для очищення насіння рицини: діаметри і висоти дробильного та зворотного конусів (480, 520 і 220–240 мм відповідно), початковий зазор (20 мм), амплітуду ходу (10–15 мм) та кут нахилу (0–4°), які забезпечують ефективне багатоетапне стиснення плодів рицини з довжиною до

18 мм без пошкодження насіння. При цьому максимальний тиск формується у зоні мінімального зазору, а мінімальний – у зоні найбільшого розкриття, що відповідає змінному характеру контакту, проілюстрованому на рис. 2.7. В результаті чисельного моделювання процесу відокремлення насіння рицини отримані залежності продуктивності розробленої машини Q (2.28), частки нерозлущених плодів (сегментів) ξ_f (2.30) від відстані між зворотнім і дробильним конусами δ, частоти обертання дробильного конусу n, діаметра отвору подачі D_{in} і кута нахилу осі дробильного конусу γ. В результаті чисельного моделювання процесу очищення насіння рицини отримано залежність вмісту ліквідного насіння у забірнику $\psi_{s\text{-}s}$ (2.34) від подачі (продуктивність відокремлення насіння) Q, кута нахилу решета β і швидкості повітряного потоку V. Статистичний аналіз отриманих рівнянь регресії дав змогу оцінити внесок кожного з досліджуваних факторів у формування цільових показників роботи машини, виокремити статистично значущі параметри та побудувати достовірні аналітичні моделі процесу. Використання методу скалярного ранжування з мінімізацією мультиплікативної цільової функції в середовищі Wolfram Cloud дало змогу визначити оптимальні значення факторів (δ = 8,6 мм; n = 291 об/хв; D_{in} = 98 мм; γ = 3,6°; β = 20,3 °; V = 6 м/с), за яких досягається максимальна продуктивність процесу (Q = 150,7 кг/год) при забезпеченні прийнятного рівня якості відокремлення (ξ_f = 0,141) та очищення $\psi_{s\text{-}s}$ = 0,956. Отримані результати підтверджують ефективність запропонованої конструкції машини та доцільність її впровадження у виробничих умовах.

5. В результаті лабораторних досліджень на спеціалізованому обладнанні встановлено основні фізико-механічні властивості плодів рицини та їх складових (сегментів, насіння і частинок коробочки), зокрема геометричні розміри (довжина L та ширина B), масу M, насипну ρ_b та дійсну ρ_d щільність, кут природного укосу φ, коефіцієнти тертя (ковзання μ` та спокою μ) та швидкість витання V. Виявлено, що насіння має найвищу дійсну щільність (567 ± 54 кг/м³) і найнижчі коефіцієнти тертя, що забезпечує його кращу сипучість і рухливість у технологічних процесах. Плоди характеризуються найбільшою масою (1,18 ± 0,13 г) і швидкістю витання (11,75 ± 1,43 м/с), що впливає на методи їх очищення та сортування. Частинки коробочки

мають найменшу щільність (101 ± 17 кг/м³) і найнижчу швидкість витання (3,21 ± 0,51 м/с), що дозволяє ефективно їх відокремлювати аеродинамічними методами. Отримані результати використані під час чисельного моделювання машини для очищення насіння рицини. Дослідження реологічних властивостей плодів і насіння рицини показало, що їх механічна поведінка при стисканні має виражену нелінійну залежність від часу та абсолютної деформації. Аналіз отриманих залежностей сили стиску F від часу t (абсолютної деформації Δx) свідчить, що процес деформації плодів рицини включає кілька послідовних етапів: початкове лінійне зростання сили в межах пружної деформації, момент розтріскування оболонки (F_{f1} = 63,67 ± 3,52 Н, Δx_{f1} = 3,32 ± 0,75 мм), уповільнення росту сили у фазі пластичної деформації, різкий спад при руйнуванні оболонки (F_{f2} = 172,96 ± 9,55 Н, Δx_{f2} = 7,19 ± 0,79 мм) та подальше плавне зростання сили під час стискання внутрішньої частини плоду. Подібний характер деформації спостерігається і для насіння рицини, однак момент руйнування (F_{s2} = 48,91 ± 8,34 Н, Δx_{s2} = 2,4 ± 0,62 мм) супроводжується різким зниженням сили без вираженої стадії пластичної деформації. Статистична обробка експериментальних даних підтвердила відповідність розподілів сил і деформацій нормальному закону розподілу.

6. В результаті експериментальних досліджень процесу відокремлення і очищення насіння рицини отримані залежності продуктивності розробленої машини Q (4.2), споживаної потужності P (4.4), питомих витрат електроенергії E (4.6), частки нерозлущених плодів (сегментів) ξ_f (4.8), вмісту ліквідного насіння у забірнику $\psi_{s\text{-}s}$ (4.10) від відстані між зворотнім і дробильним конусами δ, частоти обертання дробильного конусу n і швидкості повітряного потоку V. Проведений статистичний аналіз регресійних рівнянь дозволив визначити вплив кожного з досліджуваних факторів на цільові показники роботи машини, виявити значущі параметри та побудувати адекватні аналітичні моделі. Застосування методу скалярного ранжування з мінімізацією мультиплікативної функції в середовищі Wolfram Cloud дало змогу встановити оптимальні поєднання значень факторів (δ = 10,8 мм; n = 282 об/хв; V = 3,6 м/с), які забезпечують максимальну ефективність процесу, з урахуванням сукупності технологічних (якісних) і енергетичних критеріїв

(E = 0,0394 МДж/кг; Q =163,4 кг/год; P = 1861 Вт; ξ_f = 0,099; $\psi_{s\text{-}s}$ = 0,958). Отримані результати підтверджують доцільність подальшого впровадження запропонованої конструкції машини для очищення насіння рицини у виробничу практику. Порівняння результатів чисельного моделювання та експериментальних досліджень процесу відокремлення і очищення насіння рицини показало задовільну узгодженість за основними показниками роботи машини: продуктивністю Q, часткою нерозлущених плодів ξ_f та вмістом ліквідного насіння у забірнику $\psi_{s\text{-}s}$. Для продуктивності коефіцієнт кореляції між чисельною та експериментальною моделями склав 0,89, для частки нерозлущених плодів – 0,85, для вмісту ліквідного насіння – 0,78. Чисельні моделі враховують ширший спектр факторів, що дозволяє детальніше описати процес, тоді як експериментальні залежності спрощені, але підтверджують основні закономірності. Отримані результати свідчать про адекватність розроблених математичних моделей та їх придатність для прогнозування роботи машини і оптимізації процесу очищення насіння рицини.

7. Проведене техніко-економічне оцінювання показало, що розроблена машина для очищення насіння рицини, яка поєднує в одному агрегаті операції розлущування плодів і очищення насіння, є економічно доцільною та конкурентоспроможною порівняно з базовою системою з двох машин (Lerford Machine LLC RX-200 та СС-1 ТОВ НВО «Сортувальні машини»). Незважаючи на вищу балансову вартість, розроблений варіант забезпечує зниження загальних питомих витрат з 56,916 до 50,564 грн/кг за рахунок зменшення втрат ліквідного насіння та скорочення витрат на оплату праці. Питомий економічний ефект становить 6,351 грн/кг переробленої сировини, а строк окупності капітальних вкладень дорівнює 1,18 року, що підтверджує доцільність впровадження розробленої машини у виробничих умовах.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. European Commission. (2015). Closing the loop—An EU action plan for the circular economy (COM/2015/0614). European Commission. URL: https://bastion.wum.edu.pl/wp-content/uploads/2013/09/Europe-2020-Flagship-Initiative-Innovation-Union.pdf

2. Janiszewska, D., Olchowski, R., Nowicka, A., Zborowska, M., Marszałkiewicz, K., Shams, M., Giannakoudakis, D. A., Anastopoulos, I., & Barczak, M. (2021). Activated biochars derived from wood biomass liquefaction residues for effective removal of hazardous hexavalent chromium from aquatic environments. GCB Bioenergy, 13, 1247–1259. DOI: https://doi.org/10.1111/gcbb.12839

3. Wydra, S., Hüsing, B., Köhler, J., Schwarz, A., Schirrmeister, E., & Voglhuber-Slavinsky, A. (2021). Transition to the bioeconomy – Analysis and scenarios for selected niches. Journal of Cleaner Production, 294, 126092. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126092

4. Park, K., Sanjaya, S. A., Quach, T., & Cahoon, E. B. (2021). Toward sustainable production of value-added bioenergy and industrial oils in oilseed and biomass feedstocks. GCB Bioenergy, 13, 1610–1623. DOI: https://doi.org/10.1111/gcbb.12883

5. Román-Figueroa, C., Cea, M., Paneque, M., & González, M. E. (2020). Oil content and fatty acid composition in castor bean naturalized accessions under Mediterranean conditions in Chile. Agronomy, 10, 1145. DOI: https://doi.org/10.3390/agronomy10081145

6. Gelfand, I., Sahajpal, R., Zhang, X., Izaurralde, R. C., Gross, K. L., & Robertson, G. P. (2013). Sustainable bioenergy production from marginal lands in the US Midwest. Nature, 493, 514–517. DOI: https://doi.org/10.1038/nature11811

7. von Cossel, M., Lewandowski, I., Elbersen, B., Staritsky, I., van Eupen, M., Iqbal, Y., Mantel, S., Scordia, D., Testa, G., & Cosentino, S. L. (2019). Marginal agricultural land low-input systems for biomass production. Energies, 12, 3123. DOI: https://doi.org/10.3390/en12163123

8. D’Avino, L., Di Bene, C., Farina, R., & Razza, F. (2020). Introduction of cardoon (Cynara cardunculus L.) in a rainfed rotation to improve soil organic carbon stock in marginal lands. Agronomy, 10, 946. DOI: https://doi.org/10.3390/agronomy10070946

9. Zanetti, F., Monti, A., & Berti, M. T. (2013). Challenges and opportunities for new industrial oilseed crops in EU-27: A review. Industrial Crops and Products, 50, 580–595. DOI: https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2013.08.030

10. Alexopoulou, E., Papatheohari, Y., Zanetti, F., Tsiotas, K., Papamichael, I., Christou, M., Namatov, I., & Monti, A. (2015). Comparative studies on several castor (Ricinus communis L.) hybrids: Growth, yields, seed oil and biomass characterization. Industrial Crops and Products, 75, 8–13. DOI: https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2015.07.015

11. Інститут олійних культур НААН. (n.d.). Рицина. URL: http://imk.zp.ua/index.php/kataloh-sortiv-ta-hibrydiv/rytsyna

12. Одинець, С. І. (2017). Особливості пігментації колекційних зразків рицини звичайної. Науково-технічний бюлетень Інституту олійних культур НААН, 24, 29–38. URL: https://bulletin.imk.zp.ua/pdf/2017/24/Odinets_24.pdf

13. Ведмедєва, К. В., Кавязіна, М. Ю., & Махова, Т. В. (2018). Оцінка зразків рицини за господарсько-цінними ознаками. Науково-технічний бюлетень Інституту олійних культур НААН, 26, 39–48. URL: https://bulletin.imk.zp.ua/pdf/2018/26/Vedmedeva2_26.pdf

14. Одинець, С. І. (2018). Біометричний аналіз сім’ядольних листків проростків рицини. Науково-технічний бюлетень Інституту олійних культур НААН, 26, 60–71. URL: https://bulletin.imk.zp.ua/pdf/2018/26/Odinets_26.pdf

15. Carrino, L., Visconti, D., Fiorentino, N., & Fagnano, M. (2020). Biofuel production with castor bean: A win–win strategy for marginal land. Agronomy, 10, 1690. DOI: https://doi.org/10.3390/agronomy10111690

16. Bateni, H., & Karimi, K. (2016). Biodiesel production from castor plant integrating ethanol production via a biorefinery approach. Chemical Engineering Research and Design, 107, 4–12. DOI: https://doi.org/10.1016/j.cherd.2015.08.014

17. Ogunniyi, D. S. (2006). Castor oil: A vital industrial raw material. Bioresource Technology, 97, 1086–1091. DOI: https://doi.org/10.1016/j.biortech.2005.03.028

18. Pędzik, M., Janiszewska, D., & Rogoziński, T. (2021). Alternative lignocellulosic raw materials in particleboard production: A review. Industrial Crops and Products, 174, 114162. DOI: https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2021.114162

19. Singh, A. K. (2011). Castor oil-based lubricant reduces smoke emission in two-stroke engines. Industrial Crops and Products, 33, 287–295. DOI: https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2010.10.013

20. Anjani, K. (2012). Castor genetic resources: A primary gene pool for exploitation. Industrial Crops and Products, 35, 1–14. DOI: https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2011.06.011

21. Vallejos, M., Rondanini, D., & Wassner, D. F. (2011). Water relationships of castor bean (Ricinus communis L.) seeds related to final seed dry weight and physiological maturity. European Journal of Agronomy, 35, 93–101. DOI: https://doi.org/10.1016/j.eja.2011.04.003

22. Koutroubas, S. D., Papakosta, D. K., & Doitsinis, A. (1999). Adaptation and yielding ability of castor plant (Ricinus communis L.) genotypes in a Mediterranean climate. European Journal of Agronomy, 11, 227–237. DOI: https://doi.org/10.1016/S1161-0301(99)00034-9

23. Pari, L., Latterini, F., & Stefanoni, W. (2020). Herbaceous oil crops: A review on mechanical harvesting state of the art. Agriculture, 10, 309. DOI: https://doi.org/10.3390/agriculture10080309

24. Алієв, Е. Б. (2020). Механіко-технологічні основи процесу прецизійної сепарації насіннєвого матеріалу соняшнику: дис. ... д-ра техн. наук: 05.05.11. Запоріжжя. 530 с.

25. Алієв, Е. Б. (2019). Фізико-математичні моделі процесів прецизійної сепарації насіннєвого матеріалу соняшнику: монографія. Запоріжжя: СТАТУС. 196 с. URL: https://aliev.in.ua/doc/knigi/kniga_4.pdf

26. Петраченко, Д. О., Мохер, Ю. В., & Коропченко, С. П. (2023). Технологія обрушення насіння промислових конопель для малого бізнесу. Scientific monograph (с. 645–671). Riga, Latvia: Baltija Publishing. DOI: https://doi.org/10.30525/978-9934-26-328-6-29

27. Теслюк, Г.В. (2020). Обґрунтування технологічного процесу, параметрів та режимів роботи машини для виділення насіння гарбуза: дис. ... канд. техн. наук: 05.05.11. Дніпропетровськ. 147 с. URL: https://uacademic.info/ua/document/0410U001669

28. Самойчук, К.О., Паляничка, Н.О., & Верхоланцева, В.О. (2021). Технологічне обладнання для виробництва рослинної олії. Електронний навчальний посібник. URL: https://elib.tsatu.edu.ua/dep/mtf/ophv_29/index.html

29. Шевчук В.В., & Сукач О.М. (2018). Процеси і засоби для подрібнення насіння олійних культур: монографія. Львів: Львівський національний аграрний університет. 105 с. URL: https://repository.lnup.edu.ua/jspui/bitstream/123456789/558/1/Shevchuk_monograf.pdf

30. Журавель Д.П. (2023). Обґрунтування технологічного процесу обрушення насіння рицини для потреб кормовиробництва. Технічний прогрес у тваринництві та кормовиробництві: XI Міжнародна науково-технічна конференція, смт Глеваха Київської області – м. Київ, Україна, 2-20 жовтня 2023 року: матеріали конференції. Глеваха-Київ, 70-72. URL: http://animal-conf.inf.ua/tezy.conf.12.pdf#page=70

31. Дідур В.В. (2020). Механіко-технологічні основи глибокої переробки насіння рицини в умовах малотоннажного підприємства: дис. ... д-ра техн. наук: 05.05.11. Мелітополь. 504 с. URL: http://www.tsatu.edu.ua/nauka/wp-content/uploads/sites/49/dyssertacyja-dydur-vv_.pdf

32. Yang, L., Chen, H., Xiao, J., Fan, Y., Song, S., Zhang, Y., & Liu, X. (2021). Research on structural–mechanical properties during the castor episperm breaking process. Processes, 9, 1777. DOI: https://doi.org/10.3390/pr9101777

33. Landoni, M., Bertagnon, G., Ghidoli, M., Cassani, E., Adani, F., & Pilu, R. (2023). Opportunities and challenges of castor bean (Ricinus communis L.) genetic improvement. Agronomy, 13(8), 2076. DOI: https://doi.org/10.3390/agronomy13082076

34. Dehghani Soufi, M., Sabzimaleki, M., Khashehchi, M., Ghobadian, B., Rahmanivahid, P., & Heidari, M. (2024). Castor oil based biolubricant: Optimization of the synthesis process and investigating its effects on two-stroke engine parameters [Preprint]. Research Square. DOI: https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-4234014/v1

35. Mutlu, H., & Meier, M. A. R. (2010). Castor oil as a renewable resource for the chemical industry. European Journal of Lipid Science and Technology, 112, 10–30. DOI: https://doi.org/10.1002/ejlt.200900138

36. Pari, L., Alexopoulou, E., Stefanoni, W., Latterini, F., Cavalaris, C., & Palmieri, N. (2022). The eco-efficiency of castor supply chain: A Greek case study. Agriculture, 12(2), 206. DOI: https://doi.org/10.3390/agriculture12020206

37. European Committee for Standardization. (2019). EN 14214:2012+A2:2019 – Liquid petroleum products – Fatty acid methyl esters (FAME) for use in diesel engines and as fuel – Requirements and test methods. CEN.

38. ASTM International. (2020). ASTM D6751-20a: Standard specification for biodiesel fuel blend stock (B100) for middle distillate fuels. West Conshohocken, PA: ASTM International. DOI: DOI: https://doi.org/10.1520/D6751-20A

39. Osorio-González, C. S., Gómez-Falcon, N., Sandoval-Salas, F., Saini, R., Brar, S. K., & Ramírez, A. A. (2020). Production of biodiesel from castor oil: A review. Energies, 13(10), 2467. DOI: https://doi.org/10.3390/en13102467

40. Abel, S., Jule, L. T., Gudata, L., Nagaraj, N., Shanmugam, R., Dwarampudi, L. P., Stalin, B., & Ramaswamy, K. (2022). Preparation and characterization analysis of biofuel derived through seed extracts of Ricinus communis (castor oil plant). Scientific Reports, 12, 11021. DOI: https://doi.org/10.1038/s41598-022-14403-7

41. Vasco Leal, J. F., Cuellar-Nuñez, L., Vivanco-Vargas, M., Solís-Lozano, J. A., Díaz-Calzada, M. E., & Méndez-Gallegos, S. de J. (2022). Agribusiness potential of castor oil plant (Ricinus communis L.) in Mexico. Agro Productividad, 15(5). DOI: https://doi.org/10.32854/agrop.v15i5.2267

42. Alejandro, S., Cailliatte, R., Alcon, C., Dirick, L., Domergue, F., Correia, D., et al. (2017). Intracellular distribution of manganese by the trans-Golgi network transporter NRAMP2 is critical for photosynthesis and cellular redox homeostasis. The Plant Cell, 29(12), 3068–3084. DOI: https://doi.org/10.1105/tpc.17.00411

43. Abomughaid, M. M., Teibo, J. O., Akinfe, O. A., et al. (2024). A phytochemical and pharmacological review of Ricinus communis L. Discover Applied Sciences, 6, 315. DOI: https://doi.org/10.1007/s42452-024-05964-5

44. CIR Expert Panel. (2007). Final report on the safety assessment of Ricinus communis (castor) seed oil and related ricinoleates. International Journal of Toxicology, 26(Suppl. 3), 31–77. DOI: https://doi.org/10.1080/10915810701663150

45. Talwan, P., Gautam, D., Kumar, R., Sharma, S., Dhiman, S., Gill, R., Thakur, A., Sharma, D., Sharma, S., & Kumar, A. (2024). A review of the chemical composition, modification, and biomedical application of Ricinus communis. Indian Journal of Natural Products and Resources, 15(1). DOI: https://doi.org/10.56042/ijnpr.v15i1.155

46. Saha, P., Khomlaem, C., Aloui, H., & Kim, B. S. (2021). Biodegradable polyurethanes based on castor oil and poly(3-hydroxybutyrate). Polymers, 13(9), 1387. DOI: https://doi.org/10.3390/polym13091387

47. Vasco Leal, J. F., Cuellar-Nuñez, L., Vivanco-Vargas, M., Solís-Lozano, J. A., Díaz-Calzada, M. E., & Méndez-Gallegos, S. de J. (2022). Agribusiness potential of castor oil plant (Ricinus communis L.) in Mexico. Early Access (Vol. V), Universidad Autónoma de Querétaro. DOI: https://doi.org/10.32854/agrop.v15i5.2267

48. Helgi Library. (n.d.). Which country produces the most castor oil? URL: https://www.helgilibrary.com/charts/which-country-produces-the-most-castor-oil/

49. Ведмедєва, К. В., Кавязіна, М. Ю., & Махова, Т. В. (2018). Оцінка зразків рицини за господарсько-цінними ознаками. Науково-технічний бюлетень Інституту олійних культур НААН, 26, 39–48. URL: https://bulletin.imk.zp.ua/pdf/2018/26/Vedmedeva2_26.pdf

50. Wresearch. (n.d.). Ukraine castor oil market outlook. URL: https://www.6wresearch.com/industry-report/ukraine-castor-oil-market-outlook

51. Helgi Library. (n.d.). Castor oil seed production in Ukraine. URL: https://www.helgilibrary.com/indicators/castor-oil-seed-production/ukraine

52. IndexBox. (n.d.). Castor oil seed price in Ukraine. URL: https://www.indexbox.io/search/castor-oil-seed-price-ukraine

53. World Bank. (2019). World Integrated Trade Solution (WITS): Ukraine exports of castor oil (HS 151530). URL: https://wits.worldbank.org/trade/comtrade/en/country/UKR/year/2019/tradeflow/Exports/partner/ALL/product/151530

54. Selina Wamucii. (n.d.). Castor (Ricinus) seeds prices in Ukraine. URL: https://www.selinawamucii.com/insights/prices/ukraine/castor-ricinus-seeds

55. H.S. Chaudhary, Alok Gora, V.M. Modi, R.N. Singh. Studies the physical properties of castor (Ricinus communis L.) seeds. Int J Agric Extension Social Dev 2024;7(1):196-200. DOI: 10.33545/26180723.2024.v7.i1c.209

56. Goneli, A. L. D., Martins, M. A., Cecon, P. R., Correa, P. C., Andrade, E. T. de, Silva, F. S. da, & Silva, M. T. C. (2008). Variação das propriedades físico-mecânicas e da qualidade da mamona (Ricinus communis L.) durante a secagem e o armazenamento |

Variation of physical and mechanical properties and quality of castor beans (Ricinus communis L.) during drying and storage (Doctoral thesis, Universidade Federal de Viçosa, Brazil). FAO AGRIS. URL: https://agris.fao.org/search/en/providers/125323/records/6748459d6b7cc10eeb5ab26b?utm_source

57. Adubofuor, J., Akyereko, Y. G., Batsa, V., Apeku, O.-J. D., Amoah, I., & Diako, C. (2021). Nutrient composition and physical properties of two orange seed varieties. International Journal of Food Science, 2021, 6415620. DOI: https://doi.org/10.1155/2021/6415620

58. Gómez, J. M., Saadaoui, E., & Cervantes, E. (2016). Seed shape of castor bean (Ricinus communis L.) grown in different regions of Tunisia. Journal of Agriculture and Ecology Research International, 8(1), 1–11. DOI: https://doi.org/10.9734/JAERI/2016/23934

59. Adache, L. A., Mogaji, T. S., Olayinka, M. O., & Olagoke, Z. A. (2025). Design and finite element analysis of an extractor machine for castor oil biodiesel production. Journal of Applied Research in Technology & Engineering, 6(1). DOI: https://doi.org/10.4995/jarte.2025.21917

60. Lorestani, A. N., Jaliliantabar, F., & Gholami, R. (2012). Physical and mechanical properties of castor seed. Quality Assurance and Safety of Crops & Foods, 4, e29–e32. DOI: https://qascf.com/index.php/qas/article/view/432/417

61. Wu, Z. F., Chen, W. C., & Sheng, Z. D. (2013). Study on the harvester development of Ricinus communis. Journal of Agriculture and Forestry, 62, 33–44.

62. Liu, L. (2022). Design and optimization of picking mechanism for brush-roller castor capsule harvester (Master’s thesis, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing, China).

63. Wu, T., Kong, F. T., & Shi, L. (2022). Power consumption influence test of castor disc-cutting device. Agriculture, 12, 1535. DOI: https://doi.org/10.3390/agriculture12101535

64. Zhao, H. Y., Li, L., & Liu, G. Y. (2018). Comprehensive evaluation of castor harvester performance based on interval analytic hierarchy process and membership degree. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 39, 107–111.

65. Kong, F. T., & Wang, D. F., & Shi, L. (2023). Dynamic analysis and parameter optimization of the cutting system for castor harvester picking devices. Applied Sciences, 13, 2116. DOI: https://doi.org/10.3390/app13042116

66. China Agricultural Publishing House. (2023). NY/T 4365-2023; National agricultural industry standards, operating quality for castor harvester. Beijing, China.

67. Liu, D. Y. (2024). Design of comb-brush castor capsule picking device and its damage mechanism (Master's thesis, Shenyang Agricultural University, Shenyang, China).

68. Kong, F. T., Wu, T., & Shi, L. (2019). Research status and development prospect of Ricinus communis harvester. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 40, 32–36.

69. Wu, T., Kong, F., Zhang, B., Xie, Q., Sun, Y., & Zhao, H. (2025). Research Progress on Castor Harvesting Technology and Equipment. Sustainability, 17(13), 5703. DOI: https://doi.org/10.3390/su17135703

70. Stefanoni, W., Latterini, F., Malkogiannidis, V., Salpiggidis, V., Alexopoulou, E., & Pari, L. (2022). Mechanical harvesting of castor bean (Ricinus communis L.) with a combine harvester equipped with two different headers: A comparison of working performance. Energies, 15(9), 2999. DOI: https://doi.org/10.3390/en15092999

71. GGPBM. (n.d.). Castor seed shelling machine. https://www.ggpbm.com/product/processing/castor-seed-shelling-machine.html

72. Shelling Machine. (n.d.). Castor seeds shelling machine. https://www.shellingmachine.com/cracking-shelling-machine/castor-seeds-shelling-machine.html

73. Alibaba. (n.d.). Castor bean dehuller machine. https://www.alibaba.com/product-insights/castor-bean-dehuller-machine.html

74. Харченко, С. О., Біловод, О. І., Харченко, Ф. М., & Яровий, В. В. (2024). Причини блокування отворів перфорованих просіювальних поверхонь вібросепараторів. Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин, 54, 126–135. DOI: https://doi.org/10.32515/2414-3820.2024.54.126-135

75. Козаченко, О. В., Михайлов, А. Д., Крекот, М. М., Чала, О. С., & Завгородній, О. І. (2023). Підвищення посівних властивостей насіння сафлору красильного на вібраційній насіннєочисній машині. Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки, 7(38, ч. II), 83–90. DOI: https://doi.org/10.32515/2664-262X.2023.7(38).2.83-90

76. Petrenko, D., Shepilova, T., & Horobey, V. (2017). The study of separation of seed material in the pneumatic separator-sorter of the column type. Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин, 47(1), 196–204.

77. Петраченко, Д. О., Мохер, Ю. В., & Коропченко, С. П. (2023). Технологія обрушення насіння промислових конопель для малого бізнесу. Riga, Latvia: Baltija Publishing. DOI: https://doi.org/10.30525/978-9934-26-328-6-29

78. Теслюк, Г. В. (2010). Обґрунтування технологічного процесу, параметрів та режимів роботи машини для виділення насіння гарбуза (канд. техн. наук дис.). Дніпропетровськ. DOI: https://uacademic.info/ua/document/0410U001669

79. Самойчук, К. О., Паляничка, Н. О., & Верхоланцева, В. О. (2021). Технологічне обладнання для виробництва рослинної олії [Електронний навчальний посібник]. DOI: https://elib.tsatu.edu.ua/dep/mtf/ophv_29/index.html

80. Шевчук, В.В., & Сукач, О.М. (2018). Процеси і засоби для подрібнення насіння олійних культур: монографія. Львів: Львівський національний аграрний університет. 105 с. URL: https://repository.lnup.edu.ua/jspui/bitstream/123456789/558/1/Shevchuk_monograf.pdf

81. Дідур В.В. (2020). Механіко-технологічні основи глибокої переробки насіння рицини в умовах малотоннажного підприємства: дис. ... д-ра техн. наук: 05.05.11. Мелітополь. 504 с. URL: http://www.tsatu.edu.ua/nauka/wp-content/uploads/sites/49/dyssertacyja-dydur-vv_.pdf

82. Hou, J. M., & Li, J. P., & Yao, E. C. (2019). Calibration and analysis of discrete element parameters of typical castor. Journal of Shenyang Agricultural University, 50, 565–575.

83. Wang, L. J. (2009). Research on the improvement of 6BBS-50 type castor bean shelling machine. Agricultural Development and Equipment, 22.

84. Hou, J. M., Bai, J. B., & He, T. (2018). Design and experiment of castor dehulling and cleaning device with double curved table. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Machinery, 49, 139–147.

85. Hou, J. M., Li, J. P., & Bai, J. B. (2018). Experimental and finite element analysis of mechanical properties of castor fruit. Agricultural Development and Equipment, 49, 574–583.

86. Yang, Y. (2019). Damage law and experimental on shelling collision of castor capsule based on finite element method (Master's thesis, Shenyang Agricultural University, Shenyang, China).

87. Hou, J. M., & Bai, J. B., & Yang, Y. (2018). Study and simulation analysis on curling mechanical properties of castor stem. Journal of Northeast Agricultural University, 49, 69–78.

88. He, T. (2018). Design and experimental study of squeezing and rubbing castor shelling and cleaning device (Master's thesis, Shenyang Agricultural University, Shenyang, China).

89. Hou, J. M., Yao, E. C., & Li, J. P. (2020). Motion analysis and experiment on shelling process of kneading and pressing castor shelling machine. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Machinery, 51, 220–232.

90. Cao, Y. H., Li, C. Y., & Zhang, Z. X. (2012). Improvement design and test to key components of castor capsule hulling device. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 28, 16–22.

91. Cao, Y. H., Li, C. Y., & Qing, Y. M. (2010). Finite element analysis on mechanical properties of castor capsule. Journal of Jiangsu University (Natural Science Edition), 31, 383–387.

92. Cheng, X. X. (2013). Study on shelling method of castor beans and key technology of rolling-rubbing shelling machine (Master's thesis, Central South University, Changsha, China).

93. Li, C. Z., Liu, R. K., & Cheng, X. X. (2016). Structure design and parameters optimization of the roll-rub shelling machine for castor capsule. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 36, 110–113, 134.

94. Yao, L. L., Cao, Y. H., & Li, C. Y. (2014). Dynamics property of air-and-screen cleaning mechanism of castor hulling. Journal of Agricultural Mechanization Research, 36, 70–73.

95. Yakubu, A. U., Muhammad, U. S., & Ishiaka, M. (2020). Development and performance evaluation of a castor seed (Ricinus communis) shelling machine with a winnowing system. FUOYE Journal of Engineering and Technology, 5, 1–5.

96. Gbabo, A., Lukman, A., & Kuku, A. (2015). Design and performance assessment of a spike toothed drum mechanism for shelling of castor. International Journal of Engineering Research and Management, 2, 6–13.

97. Gatmen, N. C., Sicat, E. V., & Gavino, R. (2016). Design, fabrication, and performance evaluation of shelling machine for castor bean (Ricinus communis L.). IAMURE Multidisciplinary Research, 13, 113–128.

98. Petrů, M., Novák, O., Herák, D., & Simanjuntak, S. (2012). Finite element method model of the mechanical behavior of Jatropha curcas L. seed under compression loading. Biosystems Engineering, 111, 412–421.

99. Romuli, S., Karaj, S., & Müller, J. (2015). Influence of physical properties of Jatropha curcas L. seeds on shelling performance using a modified disc mill. Industrial Crops and Products, 77, 1053–1062.

100. Lim, B. Y., Shamsudin, R., Baharudin, B. H. T., & Yunus, R. (2016). Performance evaluation and CFD multiphase modeling for multistage Jatropha fruit shelling machine. Industrial Crops and Products, 85, 125–138.

101. Balami, A. A., Adgidzi, D., Kenneth, C. A., & Lamuwa, G. (2012). Performance evaluation of a dehusking and shelling machine for castor fruits and seeds. IOSR Journal of Engineering, 2(10), 44–48. DOI: https://doi.org/10.9790/3021-021014448

102.Yakubu, A. U., Muhammad, U. S., Isiaka, M., Sada, A. M., & Saleh, A. (2020). Development of castor (Ricinus communis) seeds shelling machine. Nigerian Journal of Engineering, 27(3), 28–34.

103. Yakubu, A. U., Muhammad, U. S., Ishiaka, M., Muhammad, S. A., & Sale, N. A. (2020). Development and performance evaluation of a castor seed (Ricinus communis) shelling machine with a winnowing system. FUOYE Journal of Engineering and Technology, 5(1), 2–5. DOI: https://doi.org/10.46792/fuoyejet.v5i1.430

104. Pius, C. O., Nnaemeka, S. P. O., Charles, O., Vincent, N. O., & Chinenye, A. I. (2014). Design enhancement evaluation of a castor seed shelling machine. Journal of Scientific Research and Reports, 3(7), 924–938. DOI: https://doi.org/10.9734/JSRR/2014/5557

105. Hou, J., Liu, X., Zhu, H., Ma, Z., Tang, Z., Yu, Y., Jin, J., & Wang, W. (2023). Design and motion process of air-sieve castor cleaning device based on discrete element method. Agriculture, 13(6), 1130. DOI: https://doi.org/10.3390/agriculture13061130

106. Дідур, В.А., Журавель, Д.П., & Герей Е.Е. (2013). Патент України на корисну модель 84933. МПК A01D 34/83 (2006.01). Машина для сепарації обчесаного вороху та очищення насіння рицини. Заявник: Таврійський державний агротехнологічний університет, № u201303791. Заявл. 27.03.2013. Опубл. 11.11.2013, бюл. № 21

107. Дідур, В.А., & Зубкова, К.В. (2011). Патент України на корисну модель 58227. МПК (2011.01) B01D 45/00. Пиловловлювач аеродинамічної сепарації сипких матеріалів, в тому числі і рушанки рицини. Заявник: Таврійський державний агротехнологічний університет, № u201010090. Заявл. 16.08.2010. Опубл. 11.04.2011, бюл. № 7

108. Larsson, J. (2023). Evaluating the performance of cone crushers under various feeding conditions using DEM and coupled DEM-MBS simulations. Mechanical Engineering, master's level. Lulea University of Technology. 56 p.

109. Алієв, Е. Б. (2023). Чисельне моделювання процесів агропромислового виробництва: підручник. Київ: Аграрна наука, 340 с. DOI: https://doi.org/10.31073/978-966-540-584-9

110. Алієв, Е. Б. (2019). Фізико-математичні моделі процесів прецизійної сепарації насіннєвого матеріалу соняшнику: монографія. Запоріжжя: СТАТУС. 196 с.

111. Алієв, Е. Б., Миколенко, С. Ю., Сова, Н. А. та ін. (2022). Техніко-технологічне забезпечення безвідходної переробки зернової сировини у харчові продукти і корми: колективна монографія / за заг. ред. Е. Б. Алієва. Дніпро: ЛІРА. 192 с.

112. 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. INMATEH – Agricultural Engineering, 54(1), 95–104.

113. Sheichenko, V., Petrachenko, D., Rogovskii, I., Dudnikov, I., Shevchuk, V., Sheichenko, D., Derkach, O., & Shatrov, R. (2024). Determining patterns in the separation of hemp seed hulls. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 4(1(130)), 54–68. DOI: https://doi.org/10.15587/1729-4061.2024.309869

114. Panasiewicz, M., Mazur, J., Zawiślak, K., Kulig, R., & Łysiak, G. (2020). The process of separation of husked soybean in oblique airflow. Sustainability, 12(18), 7566. DOI: https://doi.org/10.3390/su12187566

115. Fozilov, G., Akhmedov, A., Yuldashev, S., Akilova, U., & Juraev, K. (2024). Theoretical study of the threshing process of corn cob under the influence of the rasp bars. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 1420, 012031. DOI: https://doi.org/10.1088/1755-1315/1420/1/012031

116. Kozachenko, O., Pakhuchyi, A., Shkregal, O., Sorokin, S., Dyakonov, S., Gusarenko, M., & Kadenko, V. (2020). Experimental substantiation of the rational parameters for a reaping machine of the comb type for harvesting oil flax seeds. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 5(1(107)), 52–59. DOI: https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.212733

117. Пахучий, А. М., & Алієв, Е. Б. (2021). Симуляція процесу роботи жниварки обчісувального типу для збирання насіння льону олійного. Науково-технічний бюлетень Інституту олійних культур НААН, 30, 129–137. DOI: https://doi.org/10.36710/ioc-2021-30-13

118. Aluko, O. B., Sanni, L. A., Akingbade, T. O., & Ogundahunsi, O. (2020). Effects of impurity on the efficiency of a legume threshing machine. African Journal of Agricultural Research, 16(12), 1700–1709. DOI: https://doi.org/10.5897/AJAR2020.14895

119. Sharipov, N. Z., Kuldosheva, F. S., & Jumaev, J. (2022). Research of the effect of factors on the process of separation of shadow seeds from the peel. Eurasian Research Bulletin, 7, 86–91.

120. Sakhare, S. D., Inamdar, A. A., & Prabhasankar, P. (2015). Roller milling process for fractionation of fenugreek seeds (Trigonella foenum-graecum) and

characterization of milled fractions. Journal of Food Science and Technology, 52(4), 2211–2219. DOI: https://doi.org/10.1007/s13197-014-1279-9

121. Cundall, P. A., & Strack, O. D. L. (1979). A discrete numerical model for granular assemblies. Géotechnique, 29(1), 47–65. DOI: https://doi.org/10.1680/geot.1979.29.1.47

122. Tsunazawa, Y., Shigeto, Y., Tokoro, C., & Sakai, M. (2015). Numerical simulation of industrial die filling using the discrete element method. Chemical Engineering Science, 138, 791–809. DOI: https://doi.org/10.1016/j.ces.2015.09.014

123.Ishihara, S., Kushimoto, K., & Kano, J. (2020). Analysis of the effect of ventilation bars on the packing structure of sinter bed by DEM simulation. Energies, 13(15), 3836. DOI: https://doi.org/10.3390/en13153836

124. Tsunazawa, Y., Soma, N., & Sakai, M. (2021). DEM study on identification of mixing mechanisms in a pot blender. Advanced Powder Technology, 33(1), 103337. DOI: https://doi.org/10.1016/j.apt.2021.10.029

125. Nagata, Y., Minagawa, M., Hisatomi, S., Tsunazawa, Y., Okuyama, K., Iwamoto, M., Sekine, Y., & Tokoro, C. (2019). Investigation of optimum design for nanoparticle dispersion in centrifugal bead mill using DEM–CFD simulation. Advanced Powder Technology, 30(5), 1034–1042. DOI: https://doi.org/10.1016/j.apt.2019.02.018

126. Ramaj, I., Romuli, S., Schock, S., & Müller, J. (2024). Discrete element modelling of bulk behaviour of wheat (Triticum aestivum L.) cv. ‘Pionier’ during compressive loading. Biosystems Engineering, 242, 123–139. DOI: https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2024.04.005

127. Tsunazawa, Y., Fujihashi, D., Fukui, S., Sakai, M., & Tokoro, C. (2016). Contact force model including the liquid-bridge force for wet-particle simulation using the discrete element method. Advanced Powder Technology, 27(2), 652–660. DOI: https://doi.org/10.1016/j.apt.2016.02.021

128. Tsuji, Y., Kawaguchi, T., & Tanaka, T. (1993). Discrete particle simulation of two-dimensional fluidized bed. Powder Technology, 77(1), 79–87. DOI: https://doi.org/10.1016/0032-5910(93)85010-7

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

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

130. Shi, F. (2016). A review of the applications of the JK size-dependent breakage model. Part 2: Assessment of material strength and energy requirement in size reduction. International Journal of Mineral Processing, 157, 36–45. DOI: https://doi.org/10.1016/j.minpro.2016.09.009

131. Barrios, G. K., Jiménez-Herrera, N., & Tavares, L. M. (2020). Simulation of particle bed breakage by slow compression and impact using a DEM particle replacement model. Advanced Powder Technology, 31(7), 2749–2758. DOI: https://doi.org/10.1016/j.apt.2020.05.011

132. Potyondy, D., & Cundall, P. (2004). A bonded-particle model for rock. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 41(8), 1329–1364. DOI: https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2004.09.011

133. Zhao, Z., Wu, M., & Jiang, X. (2024). A review of contact models' properties for discrete element simulation in agricultural engineering. Agriculture, 14(2), 238. DOI: https://doi.org/10.3390/agriculture14020238

134. Дудін, В. Ю., & Білоус, І. М. (2024a). Дослідження процесу руйнування зерна кукурудзи з використанням цифрових моделей. Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки, 10(41), ч. II, 123–130. DOI: https://doi.org/10.32515/2664-262X.2024.10(41).2.123-130

135. Дудін, В. Ю., & Білоус, І. М. (2024c). Лабораторне обладнання для дослідження процесу визначення зусилля руйнування та деформації зерна. У Збірнику тез III Всеукраїнської науково-практичної конференції молодих вчених «Інжиніринг технологій і технічних систем агропромислового комплексу» (с. 170–172). ДДАЕУ. URL: https://133phd.dsau.dp.ua/images/doc/conference/2024/Theses_DDAEU(2024)_1.pdf

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

137. Білоус, І. М. (2025). Обґрунтування конструктивно-технологічних параметрів дискового подрібнювача концентрованих кормів. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису. Дисертація на здобуття освітньо-наукового ступеня доктора філософії (PhD) за спеціальністю 133 Галузеве машинобудування (13 Механічна інженерія) – Дніпровський державний аграрно-економічний університет, Міністерство освіти і науки України, Дніпро. 247 с.

138. Теслюк, Г.В., Головченко, В.В. (2025). Аналіз конструктивних особливостей машин для очищення насіння рицини. Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки, 11(42), І: 167–176. DOI: https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.11(42).1.167-178

139. Головченко, В.В. (2024). Перспективи розробки машини для очищення насіння рицини. Збірник тез ІІІ Всеукраїнської науково-практичної конференції молодих вчених «Інжиніринг технологій і технічних систем агропромислового комплексу» (15 листопада 2024 р.). Частина 2. Інноваційні технології харчової промисловості. Дніпро, ДДАЕУ: 112–114.

140. Holovchenko, V.V. (2025). Analysis of the technological line for castor seed production. Збірник тез Міжнародної наукової інтернет-конференції «Олійні культури: сьогодення та перспективи» (26 березня 2025 р.). Запоріжжя, ІОК НААН: 137–138.

141. Головченко, В.В. (2025). Класифікація машин для очищення і сепарації насіння рицини. Матеріали І Всеукраїнської науково-практичної конференції «Здобутки та перспективи розвитку харчової галузі» (30 травня 2025 р.). Дніпро. ДДАЕУ: 75–77.

142. Алієв, Е.Б., Головченко, В.В. (2025). Огляд технологій збирання і очищення рицини. Збірник матеріалів ІІ Міжнародної науково–практичної конференції «Сучасні підходи до вирощування та використання малопоширених плодових, декоративних, ароматичних та лікарських рослин для покращення екологічної ситуації в Україні» (29 серпня 2025 р.). Одеса, ІКОСГ НААН: 65–68.

143. O’Sullivan, C. (2011). Particle-based discrete element modeling: Geomechanics perspective. International Journal of Geomechanics, 11(6), 449–464. DOI: https://doi.org/10.1061/(ASCE)GM.1943-5622.0000144

144. Mindlin, R. D. (1949). Compliance of elastic bodies in contact. Journal of Applied Mechanics, 16, 259–268.

145. Hertz, H. (1881). On the contact of elastic solids. Journal für die reine und angewandte Mathematik, 92, 156–171.

146. Johnson, K. L. (1987). Contact mechanics. Cambridge University Press.

147. Mindlin, R.D.: Compliance of elastic bodies in contact. J.Appl.Mech, ASME 16, 259–268 (1949)

148. Tsuji, Y., Tanaka, T., & Ishida, T. (1992). Lagrangian numerical simulation of plug flow of cohesionless particles in a horizontal pipe. Powder Technology, 71(3), 239–250. DOI: https://doi.org/10.1016/0032-5910(92)88030-L

149. Ai, J., Chen, J. F., Rotter, J. M., & Ooi, J. Y. (2011). Assessment of rolling resistance models in discrete element simulations. Powder Technology, 206(3), 269–282. DOI: https://doi.org/10.1016/j.powtec.2010.09.030

150. Iwashita, K., & Oda, M. (1998). Rolling resistance at contacts in simulation of shear band development by DEM. Journal of Engineering Mechanics, 124(3), 285–292. DOI: https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9399(1998)124:3(285)

151. Zhou, Y., Wright, B., Yang, R. Y., Xu, B. H., & Yu, A. B. (1999). Rolling friction in the dynamic simulation of sandpile formation. Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications, 269(2–4), 536–553. DOI: https://doi.org/10.1016/S0378-4371(99)00183-1

152. Wensrich, C. M., & Katterfeld, A. (2012). Rolling friction as a technique for modelling particle shape in DEM. Powder Technology, 217, 409–417. DOI: https://doi.org/10.1016/j.powtec.2011.10.057

153. Fakhimi, A., & Villegas, T. (2007). Application of dimensional analysis in calibration of a discrete element model for rock deformation and fracture. Rock Mechanics and Rock Engineering, 40(2), 193–211. DOI: https://doi.org/10.1007/s00603-006-0093-1

154. Brown, N. J., Chen, J. F., & Ooi, J. Y. (2014). A bond model for DEM simulation of cementitious materials and deformable structures. Granular Matter, 16(3), 299–311. DOI: https://doi.org/10.1007/s10035-014-0493-0

155. Ge, R., Ghadiri, M., Bonakdar, T., Zheng, Q., Zhou, Z., Larson, I., & Hapgood, K. (2020). Deformation of 3D-printed agglomerates: Multiscale experimental tests and DEM simulation. Chemical Engineering Science, 217, 115526. DOI: https://doi.org/10.1016/j.ces.2020.115526

156. André, D., Iordanoff, I., Charles, J.-L., & Néauport, J. (2012). Discrete element method to simulate continuous material by using the cohesive beam model. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 213–216, 113–125. DOI: https://doi.org/10.1016/j.cma.2011.12.002

157. Schlangen, E., & Garboczi, E. J. (1997). Fracture simulations of concrete using lattice models: Computational aspects. Engineering Fracture Mechanics, 57(2–3), 319–332. DOI: https://doi.org/10.1016/S0013-7944(97)00010-6

158. Han, Z., Weatherley, D., & Puscasu, R. (2017). A relationship between tensile strength and loading stress governing the onset of Mode I crack propagation obtained via numerical investigations using a bonded particle model. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 41(18), 1979–1991. DOI: https://doi.org/10.1002/nag.2710

159. Mak, J., Chen, Y., & Sadek, M. (2012). Determining parameters of a discrete element model for soil–tool interaction. Soil and Tillage Research, 118, 117–122. DOI: https://doi.org/10.1016/j.still.2011.10.019

160. Kuzkin, V. A., & Asonov, I. E. (2012). Vector-based model of elastic bonds for simulation of granular solids. Physical Review E, 86(5), 051301. DOI: https://doi.org/10.1103/PhysRevE.86.051301

161. Johnson, K. L., Kendall, K., & Roberts, A. D. (1971). Surface energy and the contact of elastic solids. Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences, 324(1558), 301–313. DOI: https://doi.org/10.1098/rspa.1971.0141

162. Johansson, M., Bengtsson, M., Evertsson, C. M., & Hulthén, E. (2017). A fundamental model of an industrial-scale jaw crusher. Minerals Engineering, 105, 69–78. DOI: https://doi.org/10.1016/j.mineng.2017.01.007

163. Wu, J., Bai, H., Li, Q., & Ma, D. (2017). Grain size distribution effect on the hydraulic properties of disintegrated coal mixtures. Energies, 10(5), 612. DOI: https://doi.org/10.3390/en10050612

164. Кудрявцев, І.М. (2025). Обґрунтування конструктивно-технологічних параметрів аеродинамічного сепаратора для очищення відходів насіннєвої суміші соняшника. Дисертація на здобуття освітньо-наукового ступеня доктора філософії (PhD) за спеціальністю 133 Галузеве машинобудування (13 «Механічна інженерія»). ДДАЕУ. 227 с.

165. Кудрявцев, І. М. (2024). Чисельне моделювання процесу сепарації відходів насіннєвої суміші соняшнику в камері розрідження аеродинамічного сепаратора. Вібрації в техніці та технологіях, 2(113), 132–142. DOI: https://doi.org/10.37128/2306-8744-2024-2-15

166. Kudriavtsev, I. (2024). Numerical simulation of the waste separation process of sunflower seed mixture in the pneumatic separating channel of the aerodynamic separator. Техніка, енергетика, транспорт АПК, 2(125), 47–55. DOI: https://doi.org/10.37128/2520-6168-2024-2-5

167. Koshulko, V., & Kudriavtsev, I. (2024). Justification of the design of an aerodynamic separator for cleaning sunflower seed mixture waste. Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки, 10(41), Part II, 113–122. DOI: https://doi.org/10.32515/2664-262X.2024.10(41).2.113-122

168. Liubarets, O., & Mykytenko, M. (2025). Evaluation of efficiency and optimisation of cyclone-type dust collectors with a circular spray of reversible suspension for gas purification up to 250 °C. Innovative Solutions in Modern Science, 2(66). New York: TK Meganom LLC. DOI: https://doi.org/10.26886/2414-634X.3(67)2025.1

169. Zhao, B., & Su, Y. (2018). Particle size cut performance of aerodynamic cyclone separators: Generalized modeling and characterization by correlating global cyclone dimensions. Journal of Aerosol Science, 120, 1–11. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jaerosci.2018.02.009

170. Wang, L. (2004). Theoretical study of cyclone design (Doctoral dissertation). Texas A&M University, College Station, TX, USA.

171. Aliiev, E., Holovchenko, V., Aliieva O. (2026). Research on the Optimal Design and Process Parameters of a Castor Seed Cleaning Machine. Research in Agricultural Engineering, 72(1): 41–58. https://doi.org/10.17221/121/2025-RAE

172. Алієв, Е.Б., Теслюк, Г.В., Головченко, В.В. (2025). Чисельне моделювання машини для відокремлення і очищення насінин рицини від плодів. Сільськогосподарські машини, 51: 147–158. DOI: https://doi.org/10.36910/acm.vi51.1853

173. Алієв, Е.Б., Головченко, В.В. (2025). Патент на корисну модель України 161299, МПК (2025.01) B01D 45/00, B01D 45/18 (2006.01). Машина для очищення насіння рицини. Заявник: Дніпровський державний аграрно-економічний університет, № u 2025 03080. Заявл. 25.06.2025. Опубл. 19.11.2025, Бюл. № 47. URL: https://sis.nipo.gov.ua/uk/search/detail/1886373/

174. Алієв, Е.Б., Головченко, В.В. (2025). Розробка конструкції машини для очищення насіння рицини. Матеріали XX Міжнародної науково-практичної конференції «Технічний прогрес в АПК» (21–22 травня 2025 р.). Харків, ДБТУ: 103–105.

175. Головченко, В. В. (2025). Теоретичні дослідження стиску плодів рицини під дією робочих органів машини. Інжиніринг технологій і технічних систем агропромислового комплексу. Збірник тез IV Всеукраїнської науково-практичної конференції молодих вчених (21 листопада 2025 р.). Частина 1. Інжиніринг технічних систем агропромислового виробництва. Дніпро. ДДАЕУ: 221–225.

176. ДСТУ 4811:2007. (2007). Насіння олійних культур. Методи визначення вологості. Київ: Держспоживстандарт України.

177. ДСТУ 2708:2006. (2006). Метрологія. Повірка засобів вимірювальної техніки. Організація та порядок проведення. Київ: Держспоживстандарт України.

178. ДСТУ 4601:2006. (2006). Насіння олійних культур. Методи відбирання проб. Київ: Держспоживстандарт України.

179. ДСТУ EN 45501. (2016). Метрологічні аспекти неавтоматичних зважувальних приладів. Київ: ДП «УкрНДНЦ».

180. Алієв, Е.Б., & Ведмедєва, К.В. (2024). Кількісне фенотипування генотипів соняшнику: монографія. Дніпро: ЛІРА. 204 с.

181. Алієв Е.Б., Миколенко С.Ю., & Дудін В.Ю. Патент України на корисну модель 151728, МПК (2006) G01N 3/44 (2006.01), G01N 19/00, G01B 3/00. Пристрій для автоматичного визначення структурно-механічних властивостей харчових мас. Заявник: Дніпровський державний аграрно-економічний університет, № u202106596. Заявл. 08.09.2022. Опубл. 07.09.2022, бюл. № 36.

182. Алієв Е.Б., Миколенко С.Ю., & Дудін В.Ю. Патент України на винахід 130136, МПК (2006) G01N33/02, G01N3/02, G01N3/44. Спосіб автоматичного визначення структурно-механічних властивостей харчових мас і пристрій для його здійснення. Заявник: Дніпровський державний аграрно-економічний університет, № a202106597. Заявл. 22.11.2021. Опубл. 26.11.2025, бюл. № 48.

183. Кисельов, О. В., Комарова, І. Б., Мілько, Д. О., & Бакарджиєв, Р. О. (2017). Статистична обробка і оформлення результатів експериментальних досліджень (із досвіду написання дисертаційних робіт): Навчальний посібник. За заг. ред. Д. О. Мілька. Інститут механізації тваринництва НААН. Запоріжжя: СТАТУС. 1181 с.

184. Shumway, R. H., & Stoffer, D. S. (2011).Time series analyses and its applications: With R examples. 3-rd ed. New York: Springer. 596 p.

185. Everitt, B. S., & Hothorn, T. (2009). A handbook of statistical analyses using R (2nd ed.). Boca Raton, FL: Chapman & Hall/CRC. 376 p.

186. Вашків, П. Г., Пастер, П. І., Сторожук, В. П., & Ткач, Є. І. (2001). Теорія статистики: Навчальний посібник. К.:Либідь. 320 с.

187. Ушкаренко, Е. О., Нікішенко, В. Л., Голобородько, С. П., & Коковіхін, С. В. (2008). Дисперсійний і кореляційний аналіз у землеробстві та рослинництві: Навчальний посібник. Херсон: Айлант. 272 с.

188. Ратніков, Є. М., & Мілько, Д. О. (2020). Методика експериментальних досліджень процесу екструдування кормових компонентів з метою збільшення їх засвоюваності. І Міжнародна науково-практична конференція «Технічне забезпечення інноваційних технологій в агропромисловому комплексі», 223–225.

189. Aliiev, E., Holovchenko, V. (2025). Results of laboratory studies on the physico-mechanical properties of castor fruits and seeds. Техніка, енергетика, транспорт АПК, 1 (128): 7–15. DOI: https://doi.org/10.37128/2520-6168-2025-1-1

190. Aliiev, E., Holovchenko, V. (2025). Results of experimental studies of a castor seed cleaning machine. Техніка, енергетика, транспорт АПК, 2 (129): 47–53 DOI: https://doi.org/10.37128/2520-6168-2025-2-6

191. Алієв, Е.Б., Головченко, В.В. (2025). Результати лабораторних досліджень фізико-механічних властивостей плодів рицини та його складових. Збірник тез доповідей X Міжнародної науково-практичної конференції «Інноваційні технології в АПК» (3-4 квітня 2025 р.). Луцьк, ЛНТУ: 6–8.

192. Алієв Е., Головченко В. (2025). Результати лабораторних досліджень реологічних властивостей плодів і насіння рицини. Збірник тез доповідей Міжнародної науково-практичної конференції «Інновації в агропромисловому комплексі, машинобудуванні та транспорті» (9–10 квітня 2025 року). Рівне, НУВГП: 71–74.

193. Головченко, В.В., Алієв, Е.Б., Теслюк, Г.В. (2025). Результати експериментальних досліджень процесу відокремлення і очищення насіння рицини. Збірник тез доповідей XXVI Міжнародна наукова конференція «Сучасні проблеми землеробської механіки» (17–18 жовтня 2025 р.). Київ, НУБіП: 195–198.

194. Alibaba Group. (n.d.). Brand new multifunctional castor seed sheller. URL: https://www.alibaba.com/product-detail/Brand-New-Multifunctional-Castor-Seed-Sheller_1601490629561.html

195. ДСТУ 4397:2005. (2005). Сільськогосподарська техніка. Методи економічного оцінювання техніки на етапі випробування. Київ: Держспоживстандарт України.

196. Данильченко, М. Г., Гладич, Б. Б., Гевко, Р. Б., & Ткаченко, І. Г. (2001). Експертно-аналітична оцінка технологічних і економічних показників сільськогосподарської техніки. Тернопіль: Економічна думка.

197. Завгородній, О. І., Левкін, Д. А., Котко, Я. М., & Левкін, А. В. (2021). Економіко-математичне моделювання прогнозування ймовірних ризиків технологічних процесів. Вчені записки Таврійського національного університету імені В. І. Вернадського. Серія: Технічні науки, 32(71), № 4, 66–70. DOI: https://doi.org/10.32838/2663-5941/2021.4/10

ДОДАТКИ

Додаток А



УКРАЇНА

ПАТЕНТ

НА КОРИСНУ МОДЕЛЬ

№ 161299

МАШИНА ДЛЯ ОЧИЩЕННЯ НАСІННЯ РИЦИНИ

Видано відповідно до Закону України "Про охорону прав на винаходи і корисні моделі".

Зареєстровано в Державному реєстрі України корисних моделей **19.11.2025.**

Директор
Державної організації «Український національний офіс інтелектуальної власності та інновацій»

О.П. Орлюк

УКРНОІВІ

УКРАЇНА

(19) UA (11) 161299 (13) U

(51) МПК (2025.01)
B01D 45/00
B01D 45/18 (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 2025 03080
(22) Дата подання заявки: 25.06.2025
(24) Дата, з якої є чинними права інтелектуальної власності: 20.11.2025
(46) Публікація відомостей про державну реєстрацію: 19.11.2025, Бюл.№ 47

(72) Винахідник(и):
Алієв Ельчин Бахтияр огли (UA),
Головченко Валентин Володимирович (UA)

(73) Володілець (володільці):
ДНІПРОВСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ АГРАРНО-ЕКОНОМІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ,
вул. Сергія Єфремова, 25, м. Дніпро, 49009 (UA)

(54) МАШИНА ДЛЯ ОЧИЩЕННЯ НАСІННЯ РИЦИНИ

(57) Реферат:

Машина для очищення насіння рицини містить станину, зворотний конус, завантажувальний бункер, дробильний конус, привід. Зворотний конус складається з корпусу із внутрішньою футеровкою, чотирьох регулювальних гвинтів, чотирьох зірочок і ланцюга. Завантажувальний бункер складається з ємності і пруткової решітки. Дробильний конус складається з зовнішньої футеровки, розподільника і конічного вала. Привід складається з конусного ексцентрикового стакана-вала, кутового редуктора, веденого шківа, ременя, ведучого шківа, основаного електродвигуна. Крім цього, додатково введено систему аеродинамічного очищення, яка складається з жолоба, що розміщений під дробильним конусом, пневмосепаруючого каналу із решетом в його нижній частині, забірника насіння, який розташований під решетом, забірника нерозлущених плодів, який розташований за сходом решета, циклона, який приєднано до верхньої частини пневмосепаруючого каналу, забірника частинок коробочок і забірника дрібних частинок і пилу, які приєднані до циклона, відцентрового вентилятора і електродвигуна вентилятора

UA 161299 U

Корисна модель належить до сільськогосподарського машинобудування, зокрема до обладнання для післяжнивної переробки зернових та олійних культур, і може застосовуватися для відокремлення насінин рицини від плоду (коробочок) і очищення отриманого вороху.

Відома машина для сепарації обчесаного вороху та очищення насіння рицини [Дідур В.А., Журавель Д.П., Герей Е.Е. (2013). Патент України на корисну модель 84933. МПК A01D 34/83 (2006.01). Машина для сепарації обчесаного вороху та очищення насіння рицини. Заявник: Таврійський державний агротехнологічний університет, № u201303791. Заявл. 27.03.2013. Опубл. 11.11.2013, бюл. № 21] складається з рами, на якій встановлені бункер-живильник з регульованою заслінкою, лоток-живильник, барабан решета, струшувач решета, витратознижуючий пристрій, щітка очисна, направляючі, конвеєрно-роторне решето, пара прорезинених валків, пальцеві розрихлювачі. У вивантажувальному лотку на підшипникових опорах встановлений дозуючий пристрій, який рівномірними порціями подає ворох рицини на вальце-дековий очищувач для витирання третинок насіння, який включає конічний ротор і приводиться в обертальний рух від електродвигуна, та жорстко закріплену прорезинену деку з регульованим між ними зазором.

Недоліками такої машини є низька продуктивність і недостатня якість очищення насіння, що зумовлено слабким впливом конвеєрно-роторного решета на ворох під час транспортування. Частки вороху, розмір яких менший за перфорації решета, проходять крізь них, тоді як великі домішки, частини стебел, розплющені коробочки та їх уламки спрямовуються в окремий бункер. Водночас частки, розміри яких наближені до розміру перфорацій, забивають отвори решета, очищаючись лише в його кінцевій частині за допомогою щітки. Це суттєво зменшує робочу площу решета, що негативно впливає на продуктивність та якість очищення рицини.

Відомий пиловловлювач аеродинамічної сепарації сипких матеріалів, в тому числі і рушанки рицини [Дідур В.А., Зубкова К.В. (2011). Патент України на корисну модель 58227. МПК (2011.01) B01D 45/00. Пиловловлювач аеродинамічної сепарації сипких матеріалів, в тому числі і рушанки рицини. Заявник: Таврійський державний агротехнологічний університет, № u201010090. Заявл. 16.08.2010. Опубл. 11.04.2011, бюл. № 7] включає пилоосадову камеру з вхідним й вихідним патрубками, приймачем й перегородкою, яка виконана у вигляді криволінійної поверхні й всередині якої виконана поперечна щілина з додатковим клапаном, яка з'єднана з пиловідвідними рукавами. Додатково містить вихідний патрубок, встановлений в нижній частині пилоосадової камери, на який послідовно встановлені й герметично з'єднані між собою фланцями вертикальний канал з нижніми й верхніми жалюзі, конфузор зі зменшеним поперечним перерізом його кінцівки, фрагмент циклона та інерційний жалюзійний пиловловлювач з приймачем.

Недоліком цього пристрою є недостатня ефективність сепарації вороху рицини внаслідок того, що не розлущені плоди (коробочки) і насінини, по мірі їх переміщення, не відокремлюються від суміші.

Відома конусна дробарка [Larsson J. (2023). Evaluating the performance of cone crushers under various feeding conditions using DEM and coupled DEM-MBS simulations. Mechanical Engineering, master's level. Lulea University of Technology. 56 p.], хоча й призначена для подрібнення частинок гірської породи, прийнята як найближчий аналог для розлущування плодів рицини та відокремлення її насіння і коробочок. Пристрій складається зі станини, зворотного конуса, завантажувального бункера, дробильного конуса і привода. Зворотний конус включає корпус із внутрішньою футеровкою, чотири регулювальні гвинти, чотири зірочки та ланцюг. Завантажувальний бункер складається з ємності та пруткової решітки. Дробильний конус складається із зовнішньої футеровки, розподільника і конічного валу. Привід включає конусний ексцентриковий стакан-вал, кутовий редуктор, ведений шків, ремінь, ведучий шків і основний електродвигун.

Недоліком цього пристрою є відсутність системи очищення, що не дозволяє ефективно видаляти легкі домішки, пил і дрібні частинки після подрібнення, що негативно впливає на якість очищення насіння рицини. Також недоліком є відсутність автоматичного регулювання положення зворотного конуса під час роботи, що знижує точність налаштувань. В пристрої не передбачений блок керування, що унеможливлює централізоване та автоматизоване керування процесом очищення.

В основу корисної моделі поставлено задачу створення універсальної машини для післяжнивної переробки плодів рицини, яка забезпечує не лише ефективне розлущування коробочок і відокремлення насіння, але й високоякісне очищення отриманого вороху від легких домішок, пилу та уламків коробочок шляхом поєднання механічного подрібнення з системою аеродинамічного очищення. Додатково передбачається автоматизація окремих функціональних

вузлів з метою підвищення точності регулювання технологічних параметрів та поліпшення умов експлуатації.

Поставлена задача вирішується тим, що машина для очищення насіння рицини, яка містить станину, зворотній конус, який складається з корпусу із внутрішньою футеровкою, чотирьох регулювальних гвинтів, чотирьох зірочок і ланцюга, завантажувальний бункер, який складається з ємності і пруткової решітки, дробильний конус, який складається з зовнішньої футеровки, розподільника і конічного валу, привід, який складається з конусного ексцентрикового стакан-валу, кутового редуктора, веденого шківа, ременя, ведучого шківа, основного електродвигуна, згідно з корисною моделлю, додатково містить систему аеродинамічного очищення, яка складається з жолоба, що розміщений під дробильним конусом, пневмосепаруючого каналу із решетом в його нижній частині, забірника насіння, який розташований під решетом, забірника нерозлущених плодів, який розташований за сходом решета, циклона, який приєднано до верхньої частини пневмосепаруючого каналу, забірника частинок коробочок і забірника дрібних частинок і пилу, які приєднані до циклона, відцентрового вентилятора і електродвигуна вентилятора. Також до верхнього торця одного з чотирьох регулювальних гвинтів закріплено вал мотор-редуктора, який встановлений на корпусі із внутрішньою футеровкою. Машина для очищення насіння рицини додатково містить блок керування, який з використанням електричних проводів приєднаний до мотор-редуктора, основного електродвигуна і електродвигуна вентилятора.

Суть корисної моделі пояснюється кресленням, де представлена схема машини для очищення насіння рицини.

Машина для очищення насіння рицини складається зі станини 1, зворотного конуса 2, завантажувального бункера 3, дробильного конуса 4, привода 5, системи аеродинамічного очищення 6, блока керування 7.

Завантажувальний бункер 3 розміщений в верхній частині станини 1 і складається з ємності 8, в якій встановлена пруткова решітка 9.

Зворотний конус 2 розміщений під завантажувальним бункером 3 на станині 1 і складається з корпусу із внутрішньою футеровкою 10, чотирьох регулювальних гвинтів 11, на яких закріплені зірочки 12. Як футеровка корпусу із внутрішньою футеровкою 10 використовується гума. Регулювальні гвинти 11 вкручені по краю корпусу із внутрішньою футеровкою 10. Всі зірочки 12 з'єднані між собою у передачу з використанням ланцюга 13. Нижній торець регулювальних гвинтів 11 опирається на станину 1. До верхнього торця одного з чотирьох регулювальних гвинтів 11 закріплено вал мотор-редуктора 14, який встановлений на корпусі із внутрішньою футеровкою 10.

Дробильний конус 4 встановлений всередині корпусу із внутрішньою футеровкою 10 зворотного конуса 2 під певним кутом до осі симетрії для забезпечення коливань при обертанні. Дробильний конус 4 складається з зовнішньої футеровки 15, розподільника 16, який закріплений зверху, і конічного вала 17, який закріплений знизу. Як зовнішня футеровка 15 використовується гума.

Привід 5 містить конусний ексцентриковий стакан-вал 18, який приєднано до веденого вала кутового редуктора 19. На ведучому валу кутового редуктора 19 встановлений ведений шків 20. Через ремінь 22 ведений шків 20 утворює передачу з ведучим шківом 21, який встановлений на валу основного електродвигуна 23. Основний електродвигун 23 закріплений на станинні 1.

Система аеродинамічного очищення 6 містить жолоб 24, який розміщений під дробильним конусом 4. Жолоб 24 приєднаний до пневмосепаруючого каналу 25, в нижній частині якого розміщено під кутом до горизонту решето 26. Прохід решета 26 з'єднаний із забірником насіння 30, а його схід - із забірником нерозлущених плодів 31. Верхня частина пневмосепаруючого каналу 25 приєднана до циклона 27, в якому встановлений відцентровий вентилятор 28, що приводиться в дію електродвигуном вентилятора 29. Циклон 27 приєднаний до забірника частинок коробочок 32 і забірника дрібних частинок і пилу 33.

Мотор-редуктор 14, основний електродвигун 23 і електродвигун вентилятора 29 з використанням електричних проводів 34 приєднані до блока керування 7.

Машина для очищення насіння рицини працює наступним чином. Перед початком роботи оператор вмикає блок керування 7 і встановлює режими роботи: частота обертання дробильного конуса 4, продуктивність відцентрового вентилятора 28, найменша відстань між поверхнею корпусу із внутрішньою футеровкою 10 і зовнішньої футеровкою 15 дробильного конуса 4. Далі блок керування 7 з використанням електричних проводів 34 передає сигнал до мотор-редуктора 14, основного електродвигуна 23 і електродвигуна вентилятора 29.

Мотор-редуктор 14 приводить в обертання один регулювальний гвинт 11 і зірочку 12, яка за допомогою ланцюга 13 обертає інші зірочки 12 і відповідні регулювальні гвинти 11. При

обертанні регулювальних гвинтів 11 за (проти) годинниковою стрілкою, упираючись нижнім торцем об станину 1 зворотний конус 2 і завантажувальний бункер 3 переміщуються вгору (вниз), тим самим зменшуючи (збільшуючи) відстань між поверхнею корпусу із внутрішньою футеровкою 10 і зовнішньої футеровкою 15 дробильного конуса 4.

Основний електродвигун 23 приводить в дію дробильний конус 4 через ведучий шків 21, ремінь 22, ведений шків 20, кутовий редуктор 19, конусний ексцентриковий стакан-вал 18 і конічний вал 17. При цьому дробильний конус 4 виконує обертальний рух із одночасною прецесією його осі симетрії.

Електродвигун вентилятора 29 приводить в дію відцентровий вентилятор 28, який створює потік повітря в циклоні 27.

Зібрана суміш плодів рицини подається до завантажувального бункера 3. Плоди рицини проходять вільно через пруткову решітку 9, а більш великі рослинні домішки залишаються зверху неї. Далі плоди рицини потраплять у порожнину, яка утворена між корпусом із внутрішньою футеровкою 10 зворотного конуса 2 і зовнішньою футеровкою 15 дробильного конуса 4. Під час прецесії і обертання дробильного конуса 4 на плоди рицини діють нормальна і дотична сили, що призводить до їх стиснення і подальшого руйнування з відокремленням насіння і частинок коробочок.

Сформована суміш (частково незруйновані плоди, насіння, частинки коробочок і дрібні частинки з пилом) надходять у жолоб 24 системи аеродинамічного очищення 6 і далі під дією сили тяжіння переміщаються до пневмосепаруючого каналу 25. Під дією повітряного потоку частинки коробочок і дрібні частинки з пилом відділяються від суміші і рухаються вгору до циклона 27, де відбувається їх розділення і накопичення у забірнику частинок коробочок 32 і забірнику дрібних частинок і пилу 33 відповідно. В свою чергу, частково незруйновані плоди і насіння під дією сили тяжіння надходять на решето 26. Розмір отворів решета 26 підбирається таким чином, щоб насіння вільно проходило через нього (прохід), а незруйновані плоди залишалися на поверхні (схід). Тому насіння після проходу через решето 26 надходить у забірник насіння 30, а незруйновані плоди після сходу з решета 26 - у забірник нерозлущених плодів 31.

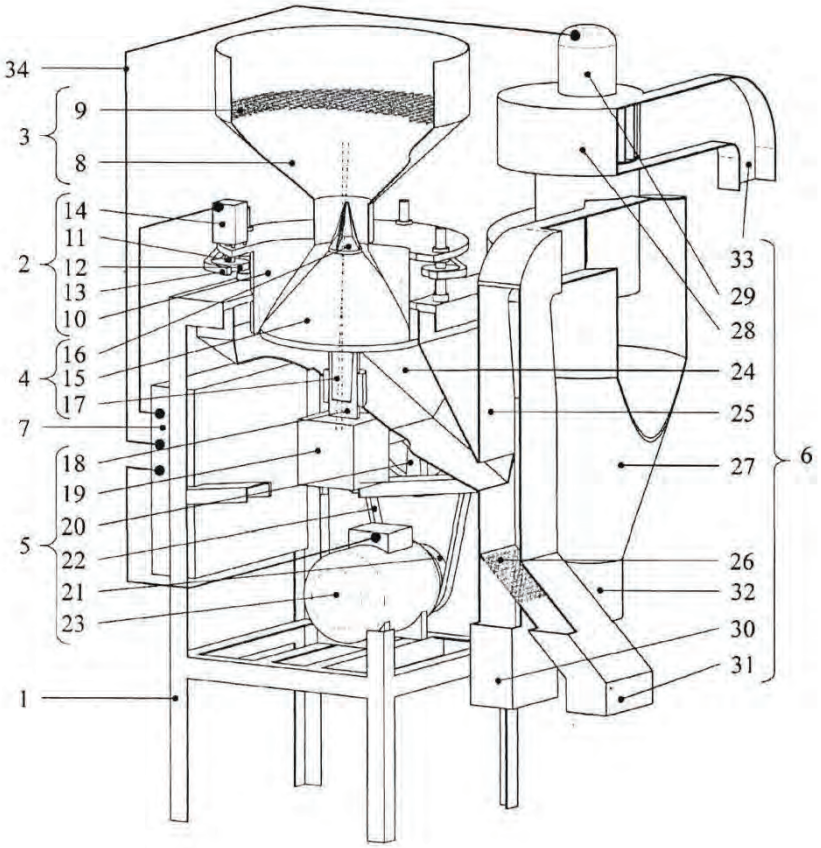
Запропонована конструкція машини для очищення насіння рицини дає можливість забезпечити комплексну післяжнивну переробку плодів рицини шляхом ефективного розлущування коробочок, відокремлення насіння та високоякісного очищення отриманого вороху від легких домішок, пилу та частинок коробочок. Завдяки поєднанню механічного подрібнення з системою аеродинамічного очищення досягається підвищення якості продукції та зменшення втрат насіння. Автоматизоване регулювання положення зворотного конуса за допомогою мотор-редуктора підвищує точність налаштувань і стабільність технологічного процесу. Додаткове оснащення машини блоком керування забезпечує автоматизацію окремих функціональних вузлів, поліпшує умови експлуатації, підвищує надійність роботи та зменшує вплив людського фактора під час роботи машини.

ФОРМУЛА КОРИСНОЇ МОДЕЛІ

1. Машина для очищення насіння рицини, що містить станину, зворотний конус, який складається з корпусу із внутрішньою футеровкою, чотирьох регулювальних гвинтів, чотирьох зірочок і ланцюга, завантажувальний бункер, який складається з ємності і пруткової решітки, дробильний конус, який складається з зовнішньої футеровки, розподільника і конічного вала, привід, який складається з конусного ексцентрикового стакана-вала, кутового редуктора, веденого шківа, ременя, ведучого шківа, основаного електродвигуна, яка **відрізняється** тим, що додатково містить систему аеродинамічного очищення, яка складається з жолоба, що розміщений під дробильним конусом, пневмосепаруючого каналу із решетом в його нижній частині, забірника насіння, який розташований під решетом, забірника нерозлущених плодів, який розташований за сходом решета, циклона, який приєднано до верхньої частини пневмосепаруючого каналу, забірника частинок коробочок і забірника дрібних частинок і пилу, які приєднані до циклона, відцентрового вентилятора і електродвигуна вентилятора.

2. Машина за п. 1, яка **відрізняється** тим, що до верхнього торця одного з чотирьох регулювальних гвинтів закріплено вал мотор-редуктора, який встановлений на корпусі із внутрішньою футеровкою.

3. Машина за п. 1, яка **відрізняється** тим, що додатково містить блок керування, який з використанням електричних проводів приєднаний до мотор-редуктора, основного електродвигуна і електродвигуна вентилятора.

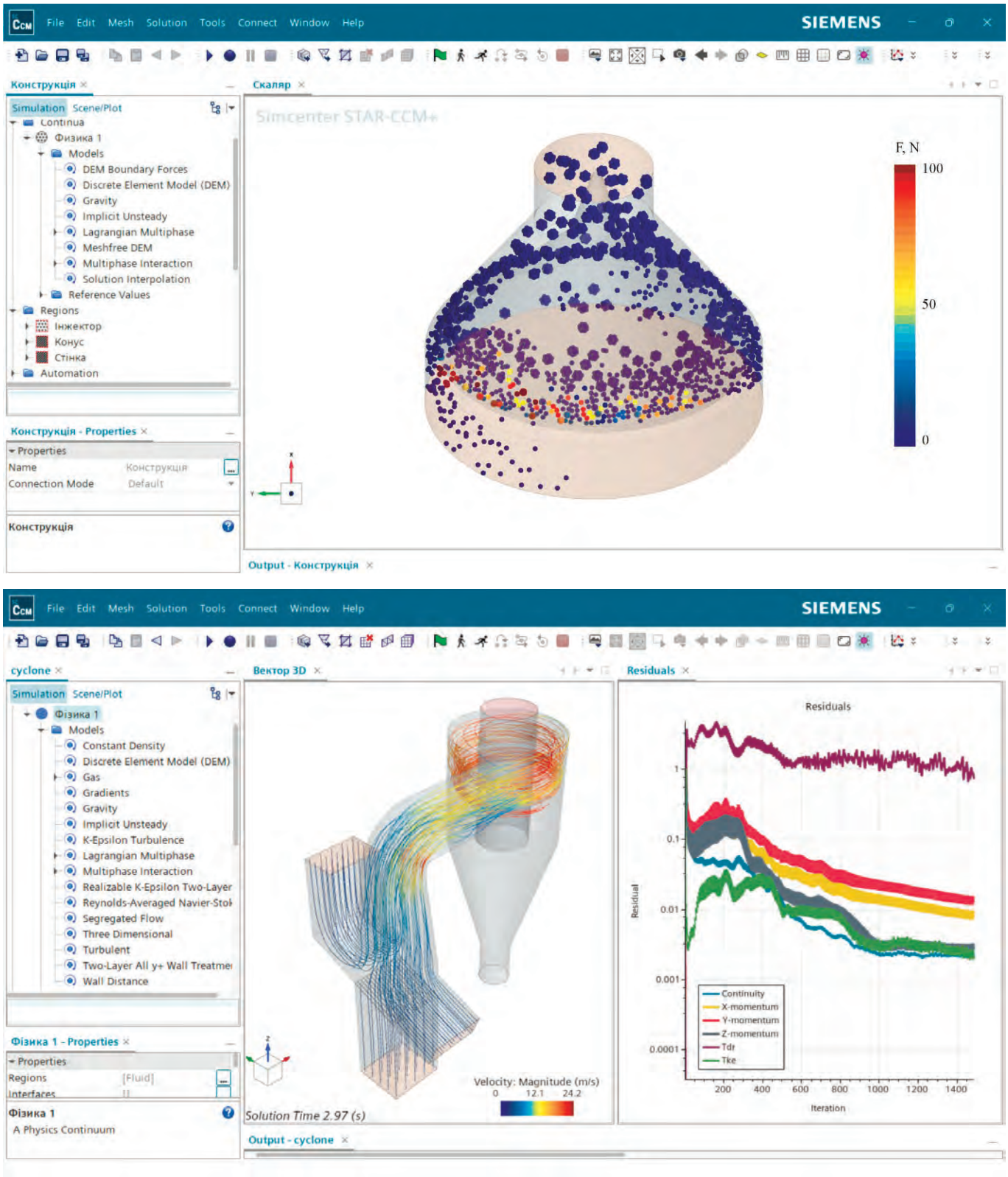


Комп'ютерна верстка О. Рябко

ДО "Український національний офіс інтелектуальної власності та інновацій", вул. Дмитра Годзенка, 1, м. Київ – 42, 01601

Додаток Б

Результати чисельного моделювання процесу відокремлення і очищення насінин рицини від плодів під дією робочих органів машини



Процес моделювання машини для очищення рицини

Зведені результати моделювання

№	x_1	x_2	x_4	x_5	δ, мм	n, об/хв	D_{in}, мм	γ, °	Q, кг/год	ξ_f
1	-1	-1	-1	-1	0	200	60	0	54,0	0,063
2	-1	-1	-1	0	0	200	60	2	65,3	0,027
3	-1	-1	-1	1	0	200	60	4	69,4	0,033
4	-1	-1	0	-1	0	200	100	0	56,1	0,085
5	-1	-1	0	0	0	200	100	2	67,3	0,049
6	-1	-1	0	1	0	200	100	4	71,3	0,039
7	-1	-1	1	-1	0	200	140	0	66,3	0,132
8	-1	-1	1	0	0	200	140	2	75,5	0,096
9	-1	-1	1	1	0	200	140	4	79,9	0,108
10	-1	0	-1	-1	0	300	60	0	71,9	0,058
11	-1	0	-1	0	0	300	60	2	82,6	0,009
12	-1	0	-1	1	0	300	60	4	88,4	0,022
13	-1	0	0	-1	0	300	100	0	79,6	0,063
14	-1	0	0	0	0	300	100	2	90,9	0,028
15	-1	0	0	1	0	300	100	4	94,6	0,037
16	-1	0	1	-1	0	300	140	0	95,8	0,126
17	-1	0	1	0	0	300	140	2	106,0	0,094
18	-1	0	1	1	0	300	140	4	110,0	0,09
19	-1	1	-1	-1	0	400	60	0	29,9	0,097
20	-1	1	-1	0	0	400	60	2	40,3	0,05
21	-1	1	-1	1	0	400	60	4	46,2	0,05
22	-1	1	0	-1	0	400	100	0	42,1	0,105
23	-1	1	0	0	0	400	100	2	54,3	0,062
24	-1	1	0	1	0	400	100	4	58,8	0,074
25	-1	1	1	-1	0	400	140	0	63,9	0,173
26	-1	1	1	0	0	400	140	2	75,6	0,133
27	-1	1	1	1	0	400	140	4	77,3	0,13
28	0	-1	-1	-1	10	200	60	0	90,0	0,193
29	0	-1	-1	0	10	200	60	2	100,3	0,151
30	0	-1	-1	1	10	200	60	4	105,2	0,151
31	0	-1	0	-1	10	200	100	0	99,1	0,205
32	0	-1	0	0	10	200	100	2	110,2	0,17
33	0	-1	0	1	10	200	100	4	114,9	0,158
34	0	-1	1	-1	10	200	140	0	116,2	0,274
35	0	-1	1	0	10	200	140	2	127,0	0,228
36	0	-1	1	1	10	200	140	4	131,2	0,211
37	0	0	-1	-1	10	300	60	0	129,7	0,199
38	0	0	-1	0	10	300	60	2	140,2	0,16
39	0	0	-1	1	10	300	60	4	144,9	0,142
40	0	0	0	-1	10	300	100	0	144,7	0,203
41	0	0	0	0	10	300	100	2	155,8	0,171
42	0	0	0	1	10	300	100	4	158,9	0,167
43	0	0	1	-1	10	300	140	0	168,4	0,268
44	0	0	1	0	10	300	140	2	176,8	0,217
45	0	0	1	1	10	300	140	4	182,5	0,221
46	0	1	-1	-1	10	400	60	0	83,9	0,249
47	0	1	-1	0	10	400	60	2	94,0	0,197
48	0	1	-1	1	10	400	60	4	98,1	0,194

№	x_1	x_2	x_4	x_5	δ, мм	n, об/хв	D_{in}, мм	γ, °	Q, кг/год	ξ_f
49	0	1	0	-1	10	400	100	0	105,7	0,264
50	0	1	0	0	10	400	100	2	115,4	0,208
51	0	1	0	1	10	400	100	4	120,3	0,204
52	0	1	1	-1	10	400	140	0	132,7	0,314
53	0	1	1	0	10	400	140	2	142,0	0,276
54	0	1	1	1	10	400	140	4	148,9	0,259
55	1	-1	-1	-1	20	200	60	0	113,1	0,244
56	1	-1	-1	0	20	200	60	2	122,4	0,21
57	1	-1	-1	1	20	200	60	4	129,5	0,193
58	1	-1	0	-1	20	200	100	0	129,7	0,259
59	1	-1	0	0	20	200	100	2	141,8	0,207
60	1	-1	0	1	20	200	100	4	144,4	0,209
61	1	-1	1	-1	20	200	140	0	156,0	0,328
62	1	-1	1	0	20	200	140	2	165,1	0,273
63	1	-1	1	1	20	200	140	4	170,6	0,254
64	1	0	-1	-1	20	300	60	0	174,6	0,265
65	1	0	-1	0	20	300	60	2	186,2	0,215
66	1	0	-1	1	20	300	60	4	189,0	0,2
67	1	0	0	-1	20	300	100	0	198,2	0,273
68	1	0	0	0	20	300	100	2	207,4	0,23
69	1	0	0	1	20	300	100	4	213,6	0,21
70	1	0	1	-1	20	300	140	0	227,2	0,333
71	1	0	1	0	20	300	140	2	237,4	0,283
72	1	0	1	1	20	300	140	4	243,2	0,273
73	1	1	-1	-1	20	400	60	0	125,7	0,313
74	1	1	-1	0	20	400	60	2	137,4	0,27
75	1	1	-1	1	20	400	60	4	140,0	0,254
76	1	1	0	-1	20	400	100	0	155,2	0,331
77	1	1	0	0	20	400	100	2	163,2	0,281
78	1	1	0	1	20	400	100	4	169,9	0,264
79	1	1	1	-1	20	400	140	0	189,9	0,386
80	1	1	1	0	20	400	140	2	201,0	0,34
81	1	1	1	1	20	400	140	4	203,8	0,332

№	x_6	x_7	x_3	Q, кг/год	β, °	V, м/с	ψ_{s-s}
1	-1	-1	-1	80	10	2	0,859
2	-1	-1	0	80	10	4	0,866
3	-1	-1	1	80	10	6	0,864
4	-1	0	-1	80	25	2	0,872
5	-1	0	0	80	25	4	0,879
6	-1	0	1	80	25	6	0,883
7	-1	1	-1	80	40	2	0,797
8	-1	1	0	80	40	4	0,809
9	-1	1	1	80	40	6	0,816
10	0	-1	-1	150	10	2	0,924
11	0	-1	0	150	10	4	0,919
12	0	-1	1	150	10	6	0,933
13	0	0	-1	150	25	2	0,937
14	0	0	0	150	25	4	0,951
15	0	0	1	150	25	6	0,954

№	x_6	x_7	x_3	Q, кг/год	β, °	V, м/с	ψ_{s-s}
16	0	1	-1	150	40	2	0,869
17	0	1	0	150	40	4	0,876
18	0	1	1	150	40	6	0,885
19	1	-1	-1	220	10	2	0,892
20	1	-1	0	220	10	4	0,911
21	1	-1	1	220	10	6	0,907
22	1	0	-1	220	25	2	0,902
23	1	0	0	220	25	4	0,913
24	1	0	1	220	25	6	0,934
25	1	1	-1	220	40	2	0,85
26	1	1	0	220	40	4	0,831
27	1	1	1	220	40	6	0,852

Програмний код в Wolfram Cloud для статистичного аналізу залежності продуктивності відокремлення насінин Q (кг/год) в розробленій машині

```
MQ = {{-1, -1, -1, -1, 54}, {-1, -1, -1, 0, 65.3}, {-1, -1, -1, 1, 69.4}, {-1, -1, 0, -1, 56.1},
   {-1, -1, 0, 0, 67.3}, {-1, -1, 0, 1, 71.3}, {-1, -1, 1, -1, 66.3}, {-1, -1, 1, 0, 75.5},
   {-1, -1, 1, 1, 79.9}, {-1, 0, -1, -1, 71.9}, {-1, 0, -1, 0, 82.6}, {-1, 0, -1, 1, 88.4},
   {-1, 0, 0, -1, 79.6}, {-1, 0, 0, 0, 90.9}, {-1, 0, 0, 1, 94.6}, {-1, 0, 1, -1, 95.8},
   {-1, 0, 1, 0, 106}, {-1, 0, 1, 1, 110}, {-1, 1, -1, -1, 29.9}, {-1, 1, -1, 0, 40.3},
   {-1, 1, -1, 1, 46.2}, {-1, 1, 0, -1, 42.1}, {-1, 1, 0, 0, 54.3}, {-1, 1, 0, 1, 58.8},
   {-1, 1, 1, -1, 63.9}, {-1, 1, 1, 0, 75.6}, {-1, 1, 1, 1, 77.3}, {0, -1, -1, -1, 90},
   {0, -1, -1, 0, 100.3}, {0, -1, -1, 1, 105.2}, {0, -1, 0, -1, 99.1}, {0, -1, 0, 0, 110.2},
   {0, -1, 0, 1, 114.9}, {0, -1, 1, -1, 116.2}, {0, -1, 1, 0, 127}, {0, -1, 1, 1, 131.2},
   {0, 0, -1, -1, 129.7}, {0, 0, -1, 0, 140.2}, {0, 0, -1, 1, 144.9}, {0, 0, 0, -1, 144.7},
   {0, 0, 0, 0, 155.8}, {0, 0, 0, 1, 158.9}, {0, 0, 1, -1, 168.4}, {0, 0, 1, 0, 176.8},
   {0, 0, 1, 1, 182.5}, {0, 1, -1, -1, 83.9}, {0, 1, -1, 0, 94}, {0, 1, -1, 1, 98.1},
   {0, 1, 0, -1, 105.7}, {0, 1, 0, 0, 115.4}, {0, 1, 0, 1, 120.3}, {0, 1, 1, -1, 132.7},
   {0, 1, 1, 0, 142}, {0, 1, 1, 1, 148.9}, {1, -1, -1, -1, 113.1}, {1, -1, -1, 0, 122.4},
   {1, -1, -1, 1, 129.5}, {1, -1, 0, -1, 129.7}, {1, -1, 0, 0, 141.8}, {1, -1, 0, 1, 144.4},
   {1, -1, 1, -1, 156}, {1, -1, 1, 0, 165.1}, {1, -1, 1, 1, 170.6}, {1, 0, -1, -1, 174.6},
   {1, 0, -1, 0, 186.2}, {1, 0, -1, 1, 189}, {1, 0, 0, -1, 198.2}, {1, 0, 0, 0, 207.4},
   {1, 0, 0, 1, 213.6}, {1, 0, 1, -1, 227.2}, {1, 0, 1, 0, 237.4}, {1, 0, 1, 1, 243.2},
   {1, 1, -1, -1, 125.7}, {1, 1, -1, 0, 137.4}, {1, 1, -1, 1, 140}, {1, 1, 0, -1, 155.2},
   {1, 1, 0, 0, 163.2}, {1, 1, 0, 1, 169.9}, {1, 1, 1, -1, 189.9}, {1, 1, 1, 0, 201},
   {1, 1, 1, 1, 203.8}};

nlmQ = NonlinearModelFit[MQ, a00 + a10 * x1 + a20 * x2 + a40 * x4 + a50 * x5 +
       нелінійна регресія
    a12 * x1 * x2 + a14 * x1 * x4 + a15 * x1 * x5 + a24 * x2 * x4 + a25 * x2 * x5 + a45 * x4 * x5 +
    a11 * x1^2 + a22 * x2^2 + a44 * x4^2 + a55 * x5^2,
   {a00, a10, a20, a40, a50, a12, a14, a15, a24, a25, a45, a11, a22, a44, a55 }, {x1, x2, x4, x5}];
nlmQ["ParameterTable"]
nlmQ["ANOVATable"]
nlmQ["RSquared"]
Normal[nlmQ]
нормальний вираз
```

```
yQteor[x1_, x2_, x4_, x5_] :=
 155.35185185185185` + 50.41111111111111` x1 - 6.022222222222218` x1^2 + 2.661111111111113` x2 +
  9.172222222222235` x1 x2 - 42.77222222222222` x2^2 + 18.85185185185188` x4 +
  7.611111111111126` x1 x4 + 5.583333333333357` x2 x4 + 3.6222222222222924` x4^2 +
  7.5037037037037075` x5 - 2.933333333333382` x5^2
yQexp[δ_, n_] := -110.28053376222121` + 1.439028635999994` n - 0.00224804905999999` n^2 +
  4.938524990222197` δ - 0.0568829153999988` δ^2
x10 = 10;
dx1 = 10;
x20 = 300;
dx2 = 100;
x40 = 100;
dx4 = 40;
x50 = 2;
dx5 = 2;
yyQteor[δ_, n_, Din_, γ_] := yQteor[(δ - x10) / dx1, (n - x20) / dx2, (Din - x40) / dx4,
    (γ - x50) / dx5];
Expand[yyQteor[δ, n, Din, γ]]
розкрити дужки
OptQ = FindMaximum[{yyQteor[δ, n, Din, γ], x10 - dx1 ≤ δ ≤ x10 + dx1, x20 - dx2 ≤ n ≤ x20 + dx2,
      знайти максимум
   x40 - dx4 ≤ Din ≤ x40 + dx4, x50 - dx5 ≤ γ ≤ x50 + dx5}, {δ, x10 - 0 dx1}, {n, x20 - 0 dx2},
  {Din, x40 - 0 dx4}, {γ, x50 - 0 dx5}]
δoptQ = δ /. Last[OptQ];
          останній
noptQ = n /. Last[OptQ];
          останній
DinoptQ = Din /. Last[OptQ];
            останній
γoptQ = γ /. Last[OptQ];
          останній
Plot3D[{yyQteor[δ, n, DinoptQ, γoptQ]}, {δ, x10 - dx1, x10 + dx1}, {n, x20 - dx2, x20 + dx2},
графік функції 2-х змінних
 AxesLabel → {"δ, мм  ", "n, об/хв  ", "Q, кг/год  "},
 позначення на осях
 LabelStyle → Directive[FontSize → 14, FontFamily → "Times", PlotLegends → "Expressions"],
 стиль помітки  директива  розмір шрифту  сімейство шрифту  легенди графіка
 Mesh → 30, PlotStyle → {Green}]
 сітка  стиль графіка  зелений

Plot3D[{yyQteor[δoptQ, noptQ, Din, γ]}, {Din, x40 - dx4, x40 + dx4}, {γ, x50 - dx5, x50 + dx5},
графік функції 2-х змінних
 AxesLabel → {"Din, мм  ", "γ, °  ", "Q, кг/год  "},
 позначення на осях
 LabelStyle → Directive[FontSize → 14, FontFamily → "Times", PlotLegends → "Expressions"],
 стиль помітки  директива  розмір шрифту  сімейство шрифту  легенди графіка
 Mesh → 30, PlotStyle → {Green}]
 сітка  стиль графіка  зелений
Plot3D[{yyQteor[δ, n, DinoptQ, γoptQ], yQexp[δ, n]}, {δ, x10 - dx1, x10 + dx1},
графік функції 2-х змінних
 {n, x20 - dx2, x20 + dx2}, AxesLabel → {"δ, мм  ", "n, об/хв  ", "Q, кг/год  "},
                              позначення на осях
 LabelStyle → Directive[FontSize → 14, FontFamily → "Times", PlotLegends → "Expressions"],
 стиль помітки  директива  розмір шрифту  сімейство шрифту  легенди графіка
 Mesh → 30, PlotStyle → {Green, Magenta}]
 сітка  стиль графіка  зеле···  малиновий
```

Програмний код в Wolfram Cloud для статистичного аналізу залежності частки нерозлущених плодів (сегментів) ξ_f в розробленій машині

```
Mξ = {{-1, -1, -1, -1, 0.063}, {-1, -1, -1, 0, 0.027}, {-1, -1, -1, 1, 0.033},
   {-1, -1, 0, -1, 0.085}, {-1, -1, 0, 0, 0.049}, {-1, -1, 0, 1, 0.039}, {-1, -1, 1, -1, 0.132},
   {-1, -1, 1, 0, 0.096}, {-1, -1, 1, 1, 0.108}, {-1, 0, -1, -1, 0.058}, {-1, 0, -1, 0, 0.009},
   {-1, 0, -1, 1, 0.022}, {-1, 0, 0, -1, 0.063}, {-1, 0, 0, 0, 0.028}, {-1, 0, 0, 1, 0.037},
   {-1, 0, 1, -1, 0.126}, {-1, 0, 1, 0, 0.094}, {-1, 0, 1, 1, 0.09}, {-1, 1, -1, -1, 0.097},
   {-1, 1, -1, 0, 0.05}, {-1, 1, -1, 1, 0.05}, {-1, 1, 0, -1, 0.105}, {-1, 1, 0, 0, 0.062},
   {-1, 1, 0, 1, 0.074}, {-1, 1, 1, -1, 0.173}, {-1, 1, 1, 0, 0.133}, {-1, 1, 1, 1, 0.13},
   {0, -1, -1, -1, 0.193}, {0, -1, -1, 0, 0.151}, {0, -1, -1, 1, 0.151}, {0, -1, 0, -1, 0.205},
   {0, -1, 0, 0, 0.17}, {0, -1, 0, 1, 0.158}, {0, -1, 1, -1, 0.274}, {0, -1, 1, 0, 0.228},
   {0, -1, 1, 1, 0.211}, {0, 0, -1, -1, 0.199}, {0, 0, -1, 0, 0.16}, {0, 0, -1, 1, 0.142},
   {0, 0, 0, -1, 0.203}, {0, 0, 0, 0, 0.171}, {0, 0, 0, 1, 0.167}, {0, 0, 1, -1, 0.268},
   {0, 0, 1, 0, 0.217}, {0, 0, 1, 1, 0.221}, {0, 1, -1, -1, 0.249}, {0, 1, -1, 0, 0.197},
   {0, 1, -1, 1, 0.194}, {0, 1, 0, -1, 0.264}, {0, 1, 0, 0, 0.208}, {0, 1, 0, 1, 0.204},
   {0, 1, 1, -1, 0.314}, {0, 1, 1, 0, 0.276}, {0, 1, 1, 1, 0.259}, {1, -1, -1, -1, 0.244},
   {1, -1, -1, 0, 0.21}, {1, -1, -1, 1, 0.193}, {1, -1, 0, -1, 0.259}, {1, -1, 0, 0, 0.207},
   {1, -1, 0, 1, 0.209}, {1, -1, 1, -1, 0.328}, {1, -1, 1, 0, 0.273}, {1, -1, 1, 1, 0.254},
   {1, 0, -1, -1, 0.265}, {1, 0, -1, 0, 0.215}, {1, 0, -1, 1, 0.2}, {1, 0, 0, -1, 0.273},
   {1, 0, 0, 0, 0.23}, {1, 0, 0, 1, 0.21}, {1, 0, 1, -1, 0.333}, {1, 0, 1, 0, 0.283},
   {1, 0, 1, 1, 0.273}, {1, 1, -1, -1, 0.313}, {1, 1, -1, 0, 0.27}, {1, 1, -1, 1, 0.254},
   {1, 1, 0, -1, 0.331}, {1, 1, 0, 0, 0.281}, {1, 1, 0, 1, 0.264}, {1, 1, 1, -1, 0.386},
   {1, 1, 1, 0, 0.34}, {1, 1, 1, 1, 0.332}};

nlmξ = NonlinearModelFit[Mξ, a00 + a10 * x1 + a20 * x2 + a40 * x4 + a50 * x5 +
       нелінійна регресія
    a12 * x1 * x2 + a14 * x1 * x4 + a15 * x1 * x5 + a24 * x2 * x4 + a25 * x2 * x5 + a45 * x4 * x5 +
    a11 * x1^2 + a22 * x2^2 + a44 * x4^2 + a55 * x5^2,
   {a00, a10, a20, a40, a50, a12, a14, a15, a24, a25, a45, a11, a22, a44, a55}, {x1, x2, x4, x5}];
nlmξ["ParameterTable"]
nlmξ["ANOVATable"]
nlmξ["RSquared"]
Normal[nlmξ]
нормальний вираз

yξteor[x1_, x2_, x4_, x5_] := 0.1661111111111111` + 0.09624074074074075` x1 -
  0.03787037037037029` x1^2 + 0.023333333333333352` x2 + 0.009777777777777769` x1 x2 +
  0.023074074074073872` x2^2 + 0.035981481481481496` x4 + 0.023129629629629934` x4^2 -
  0.024518518518518558` x5 - 0.006222222222222213` x1 x5 + 0.018740740740740582` x5^2
yξexp[δ_, n_] := 0.5507958333333337` + 6.130416666666671`*^-6 n^2 +
  n (-0.0036535000000000022` + 9.250000000000001`*^-6 δ) + 0.00891541666666666` δ -
  0.000285208333333333` δ^2
x10 = 10;
dx1 = 10;
x20 = 300;
dx2 = 100;
x40 = 100;
dx4 = 40;
x50 = 2;
dx5 = 2;
```

```
yyξteor[δ_, n_, Din_, γ_] := yξteor[(δ - x10) / dx1, (n - x20) / dx2, (Din - x40) / dx4,
    (γ - x50) / dx5];
Expand[yyξteor[δ, n, Din, γ]]
розкрити дужки

Optξ = FindMinimum[{yyξteor[δ, n, Din, γ], x10 - dx1 ≤ δ ≤ x10 + dx1, x20 - dx2 ≤ n ≤ x20 + dx2,
      знайти мінімум
    x40 - dx4 ≤ Din ≤ x40 + dx4, x50 - dx5 ≤ γ ≤ x50 + dx5}, {δ, x10 - 0 dx1}, {n, x20 - 0 dx2},
   {Din, x40 - 0 dx4}, {γ, x50 - 0 dx5}]
δoptξ = δ /. Last[Optξ];
          останній
noptξ = n /. Last[Optξ];
          останній
Dinoptξ = Din /. Last[Optξ];
            останній
γoptξ = γ /. Last[Optξ];
          останній
Plot3D[{yyξteor[δ, n, Dinoptξ, γoptξ]}, {δ, x10 - dx1, x10 + dx1}, {n, x20 - dx2, x20 + dx2},
графік функції 2-х змінних
 AxesLabel → {"δ, мм  ", "n, об/хв  ", "ξf  "},
 позначення на осях
 LabelStyle → Directive[FontSize → 14, FontFamily → "Times", PlotLegends → "Expressions"],
 стиль помітки  директива  розмір шрифту  сімейство шрифту  легенди графіка
 Mesh → 30, PlotStyle → {Magenta}]
 сітка  стиль графіка  малиновий

Plot3D[{yyξteor[δoptξ, noptξ, Din, γ]}, {Din, x40 - dx4, x40 + dx4}, {γ, x50 - dx5, x50 + dx5},
графік функції 2-х змінних
 AxesLabel → {"Din, мм  ", "γ, °  ", "ξf  "},
 позначення на осях
 LabelStyle → Directive[FontSize → 14, FontFamily → "Times", PlotLegends → "Expressions"],
 стиль помітки  директива  розмір шрифту  сімейство шрифту  легенди графіка
 Mesh → 30, PlotStyle → {Magenta}]
 сітка  стиль графіка  малиновий
Plot3D[{yyξteor[δ, n, Dinoptξ, γoptξ], yξexp[δ, n]}, {δ, x10 - dx1, x10 + dx1},
графік функції 2-х змінних
 {n, x20 - dx2, x20 + dx2}, AxesLabel → {"δ, мм  ", "n, об/хв  ", "ξf  "},
                            позначення на осях
 LabelStyle → Directive[FontSize → 14, FontFamily → "Times", PlotLegends → "Expressions"],
 стиль помітки  директива  розмір шрифту  сімейство шрифту  легенди графіка
 Mesh → 30, PlotStyle → {Green, Magenta}]
 сітка  стиль графіка  зеле…  малиновий
```

Програмний код в Wolfram Cloud для статистичного аналізу залежності вмісту ліквідного насіння у забірнику $\psi_{s\text{-}s}$ в розробленій машині

```
Mψ = {{-1, -1, -1, 0.859}, {-1, -1, 0, 0.866}, {-1, -1, 1, 0.864}, {-1, 0, -1, 0.872},
   {-1, 0, 0, 0.879}, {-1, 0, 1, 0.883}, {-1, 1, -1, 0.797}, {-1, 1, 0, 0.809},
   {-1, 1, 1, 0.816}, {0, -1, -1, 0.924}, {0, -1, 0, 0.919}, {0, -1, 1, 0.933},
   {0, 0, -1, 0.937}, {0, 0, 0, 0.951}, {0, 0, 1, 0.954}, {0, 1, -1, 0.869}, {0, 1, 0, 0.876},
   {0, 1, 1, 0.885}, {1, -1, -1, 0.892}, {1, -1, 0, 0.911}, {1, -1, 1, 0.907},
   {1, 0, -1, 0.902}, {1, 0, 0, 0.913}, {1, 0, 1, 0.934}, {1, 1, -1, 0.85}, {1, 1, 0, 0.831},
   {1, 1, 1, 0.852}};
```

```
nlmψ = NonlinearModelFit[Mψ, a00 + a60 * x6 + a70 * x7 + a30 * x3 +
       нелінійна регресія
    a67 * x6 * x7 + a63 * x6 * x3 + a73 * x7 * x3 +
    a66 * x6^2 + a77 * x7^2 + a33 * x3^2, {a00, a60, a70, a30, a67, a63, a73, a66, a77, a33},
   {x6, x7, x3}];
nlmψ["ParameterTable"]
nlmψ["ANOVATable"]
nlmψ["RSquared"]
Normal[nlmψ]
нормальний вираз
```

```
yψteor[x6_, x7_, x3_] := 0.944962962962963` + 0.007000000000000068` x3 + 0.019277777777777862` x6 -
  0.047722222222222284` x6^2 - 0.02722222222222216` x7 - 0.043888888888888956` x7^2
yψexp[δ_, n_, V_] := 0.6658199600000058` - 1.6641666666666303`*^-6 n^2 + 0.0006770833333334675` V^2 +
  n (0.0012542999999999773` - 0.0000190899999999999` δ) +
  V (-0.003809166666667755` + 0.0001250000000000015` δ) + 0.014334233333333245` δ -
  0.00021641666666666397` δ^2
yQexp[δ_, n_] := -110.28053376222121` + 1.439028635999994` n - 0.00224804905999999` n^2 +
   4.938524990222197` δ - 0.0568829153999988` δ^2;
NSolve[yQexp[δ, n] == Q, δ]
чисельне наближення розв'язку рівнянь
δδ[n_, Q_] := 8.861174643193645`*^-8 ×
   (4.89884972`*^8 - 8.085715125989964`*^-16 ×
      √(-1.0584920321145699`*^46 + 4.927970785077896`*^45 n - 7.698470908748355`*^42 n^2 -
         3.424511967166939`*^45 Q));
```

```
x60 = 150;
dx6 = 70;
x70 = 25;
dx7 = 15;
x30 = 4;
dx3 = 2;
yyψteor[Q_, β_, V_] := yψteor[(Q - x60) / dx6, (β - x70) / dx7, (V - x30) / dx3];
Expand[yyψteor[Q, β, V]]
розкрити дужки
Optψ = FindMaximum[{yyψteor[Q, β, V], x60 - dx6 ≤ Q ≤ x60 + dx6, x70 - dx7 ≤ β ≤ x70 + dx7,
       знайти максимум
   x30 - dx3 ≤ V ≤ x30 + dx3}, {Q, x60 - 0 dx6}, {β, x70 - 0 dx7}, {V, x30 - 0 dx3}]
Qoptψ = Q /. Last[Optψ];
                останній
βoptψ = β /. Last[Optψ];
                останній
Voptψ = V /. Last[Optψ];
                останній
yyψteor[150.7, βoptψ, Voptψ]
```

```
Plot3D[{yyψteor[Q, β, Voptψ]}, {Q, x60 - dx6, x60 + dx6}, {β, x70 - dx7, x70 + dx7},
графік функції 2-х змінних
 AxesLabel → {"Q, кг/год ", "β, ° ", "ψ s-s "},
 позначення на осях
 LabelStyle → Directive[FontSize → 14, FontFamily → "Times", PlotLegends → "Expressions"],
 стиль помітки  директива  розмір шрифту  сімейство шрифту  легенди графіка
 Mesh → 30, PlotStyle → {Yellow}]
 сітка  стиль графіка  жовтий
Plot3D[{yyψteor[Q, βoptψ, V]}, {Q, x60 - dx6, x60 + dx6}, {V, x30 - dx3, x30 + dx3},
графік функції 2-х змінних
```

```
  AxesLabel → {"Q, кг/год  ", "V, м/с  ", "ψs–s  "},
    позначення на осях
  LabelStyle → Directive[FontSize → 14, FontFamily → "Times", PlotLegends → "Expressions"],
    стиль помітки  директива  розмір шрифту  сімейство шрифту  легенди графіка
  Mesh → 30, PlotStyle → {Yellow}]
    сітка  стиль графіка  жовтий

Plot3D[{yyψteor[Qoptψ, β, V]}, {β, x70 - dx7, x70 + dx7}, {V, x30 - dx3, x30 + dx3},
  графік функції 2–х змінних
  AxesLabel → {"β, °  ", "V, м/с  ", "ψs–s  "},
    позначення на осях
  LabelStyle → Directive[FontSize → 14, FontFamily → "Times", PlotLegends → "Expressions"],
    стиль помітки  директива  розмір шрифту  сімейство шрифту  легенди графіка
  Mesh → 30, PlotStyle → {Yellow}]
    сітка  стиль графіка  жовтий

nopt = 400;

Plot3D[{yyψteor[Q, βoptψ, V], yψexp[δδ[nopt, Q], nopt, V]}, {Q, x60 - dx6, 200},
  графік функції 2–х змінних
  {V, x30 - dx3, x30 + dx3}, AxesLabel → {"Q, кг/год  ", "V, м/с  ", "ψs–s  "},
                               позначення на осях
  LabelStyle → Directive[FontSize → 14, FontFamily → "Times", PlotLegends → "Expressions"],
    стиль помітки  директива  розмір шрифту  сімейство шрифту  легенди графіка
  Mesh → 30, PlotStyle → {Green, Magenta}]
    сітка  стиль графіка  зеле···  малиновий
```

Додаток В

Результати експериментальних досліджень процесу відокремлення і очищення насіння рицини

№	x_1	x_2	x_3	δ, мм	n, об/хв	V, м/с	Q, кг/год				P, Вт			
							1	2	3	Сер.	1	2	3	Сер.
1	1	1	0	20	400	4	184,8	178,0	181,0	181,3	1856	1914	1905	1892
2	1	-1	0	20	200	4	162,0	154,0	161,6	159,2	1431	1559	1462	1484
3	-1	1	0	0	400	4	108,9	102,8	106,5	106,1	2460	2615	2548	2541
4	-1	-1	0	0	200	4	97,5	88,3	90,3	92,0	1957	2066	1931	1985
5	0	0	0	10	300	4	163,1	159,1	161,7	161,3	1880	1962	1942	1928
6	1	0	1	20	300	6	206,7	195,0	196,0	199,2	1797	1870	1811	1826
7	1	0	-1	20	300	2	200,0	189,3	193,7	194,3	1400	1537	1420	1452
8	-1	0	1	0	300	6	125,0	112,2	115,2	117,5	2303	2499	2364	2389
9	-1	0	-1	0	300	2	118,9	110,1	114,1	114,4	1979	2144	2004	2042
10	0	0	0	10	300	4	170,8	165,6	165,6	167,3	1931	2025	1985	1980
11	0	1	1	10	400	6	153,9	146,1	151,8	150,6	2330	2426	2431	2396
12	0	1	-1	10	400	2	150,9	143,1	145,8	146,6	1950	2101	1987	2013
13	0	-1	1	10	200	6	135,7	129,8	132,1	132,6	1896	1964	1925	1929
14	0	-1	-1	10	200	2	132,4	125,3	128,0	128,6	1528	1619	1509	1552
15	0	0	0	10	300	4	161,8	154,8	162,8	159,8	1911	2030	2006	1982

№	E, МДж/кг				ξ_f				ψ_{s-s}			
	1	2	3	Сер.	1	2	3	Сер.	1	2	3	Сер.
1	0,0348	0,0388	0,0395	0,0377	0,213	0,197	0,217	0,209	0,961	0,952	0,952	0,955
2	0,0314	0,0369	0,0328	0,0337	0,174	0,155	0,172	0,167	0,985	0,976	0,980	0,980
3	0,0832	0,0917	0,0870	0,0873	0,073	0,067	0,070	0,070	0,905	0,892	0,892	0,896
4	0,0760	0,0790	0,0784	0,0778	0,070	0,057	0,068	0,065	0,855	0,840	0,840	0,845
5	0,0408	0,0458	0,0424	0,0430	0,109	0,088	0,092	0,096	0,966	0,952	0,960	0,959
6	0,0318	0,0348	0,0324	0,0330	0,137	0,114	0,128	0,126	0,995	0,985	0,995	0,992
7	0,0241	0,0296	0,0273	0,0270	0,133	0,121	0,130	0,128	0,986	0,970	0,982	0,979
8	0,0689	0,0779	0,0734	0,0734	0,009	0,011	0,002	0,007	0,902	0,889	0,887	0,893
9	0,0624	0,0689	0,0634	0,0649	0,016	0,005	0,004	0,008	0,898	0,887	0,884	0,890
10	0,0391	0,0446	0,0450	0,0429	0,099	0,089	0,091	0,093	0,959	0,949	0,954	0,954
11	0,0534	0,0604	0,0587	0,0575	0,173	0,159	0,175	0,169	0,961	0,950	0,962	0,958
12	0,0466	0,0531	0,0485	0,0494	0,176	0,156	0,175	0,169	0,948	0,940	0,938	0,942
13	0,0501	0,0536	0,0532	0,0523	0,154	0,131	0,147	0,144	0,949	0,942	0,944	0,945
14	0,0428	0,0453	0,0436	0,0439	0,152	0,137	0,152	0,147	0,937	0,925	0,926	0,929
15	0,0366	0,0441	0,0408	0,0405	0,106	0,082	0,097	0,095	0,968	0,955	0,955	0,959

Програмний код в Wolfram Cloud для статистичного аналізу залежності продуктивності Q розробленої машини для очищення насіння рицини

```
MQ = {{1, 1, 0, 181.250332393333}, {1, -1, 0, 159.20163906}, {-1, 1, 0, 106.053143326667},
   {-1, -1, 0, 92.02215666}, {0, 0, 0, 161.3006}, {1, 0, 1, 199.229918682222},
   {1, 0, -1, 194.341029793333}, {-1, 0, 1, 117.494698237778}, {-1, 0, -1, 114.383587126667},
   {0, 0, 0, 167.3006}, {0, 1, 1, 150.5900294}, {0, 1, -1, 146.5900294}, {0, -1, 1, 132.5501894},
   {0, -1, -1, 128.5501894}, {0, 0, 0, 159.8006}};
x10 = 10;
dx1 = 10;
x20 = 300;
dx2 = 100;
x30 = 4;
dx3 = 2;
y1Q[x1_, x2_, x3_] = 162.8006 + 38.0086668222222 x1 + 9.01992 x2 + 2 x3 + 2.00442666666667 x1 x2 +
   0.444444444444443 x1 x3 + 0 x2 x3 + -5.68829153999988 x1 x1 + -22.4804905999999 x2 x2 +
   -0.749999999999915 x3 x3;
y2Q[x1_, x2_, x3_] = 162.8006 + 38.0086668222222 x1 + 9.01992 x2 + 0 x3 + 0 x1 x2 + 0 x1 x3 +
   0 x2 x3 + -5.68829153999988 x1 x1 + -22.4804905999999 x2 x2 + 0 x3 x3;
y3Q[x1_, x2_, x3_] = y2Q[(x1 - 10) / 10, (x2 - 300) / 100, (x3 - 4) / 2];
X = {1, x1, x2, x3, x1 * x2, x1 * x3, x2 * x3, x1^2, x2^2, x3^2};
y0Q[x1_, x2_, x3_] = Fit[MQ, X, {x1, x2, x3}];
                     узгодити
y0Q[x1, x2, x3]
y1Q[x1, x2, x3]
y2Q[x1, x2, x3]
Simplify[y3Q[δ, n, V]]
спростити
nlmQ = NonlinearModelFit[MQ, a00 + a10 * x1 + a20 * x2 + a30 * x3 + a12 * x1 * x2 + a13 * x1 * x3 +
       нелінійна регресія
    a23 * x2 * x3 + a11 * x1^2 + a22 * x2^2 + a33 * x3^2,
   {a00, a10, a20, a30, a12, a13, a23, a11, a22, a33}, {x1, x2, x3}];
nlmQ["ParameterTable"]
nlmQ["ANOVATable"]
nlmQ["RSquared"]
OptQ = FindMaximum[{y3Q[δ, n, V], x10 - dx1 ≤ δ ≤ x10 + dx1, x20 - dx2 ≤ n ≤ x20 + dx2,
       знайти максимум
   x30 - dx3 ≤ V ≤ x30 + dx3}, {δ, x10 - dx1}, {n, x20 - dx2}, {V, x30 - dx3}]
δoptQ = δ /. Last[OptQ];
              останній
noptQ = n /. Last[OptQ];
              останній
VoptQ = V /. Last[OptQ];
              останній
Plot3D[{y3Q[δ, n, VoptP]}, {δ, x10 - dx1, x10 + dx1}, {n, x20 - dx2, x20 + dx2},
графік функції 2–х змінних
 AxesLabel → {"δ, мм ", "  n, об/хв ", "  Q, кг/год "},
 позначення на осях
 LabelStyle → Directive[FontSize → 14, FontFamily → "Times", PlotLegends → "Expressions"],
 стиль помітки  директива  розмір шрифту  сімейство шрифту  легенди графіка
 Mesh → 30, PlotStyle → {Cyan}]
 сітка  стиль графіка  блакитний
```

```
Plot3D[{y3Q[δoptQ, n, V]}, {n, x20 - dx2, x20 + dx2}, {V, x30 - dx3, x30 + dx3},
```
графік функції 2–х змінних
```
 AxesLabel → {"n, об/хв  ", "V, м/с  ", "Q, кг/год  "},
```
позначення на осях
```
 LabelStyle → Directive[FontSize → 14, FontFamily → "Times", PlotLegends → "Expressions"],
```
стиль помітки директива розмір шрифту сімейство шрифту легенди графіка
```
 Mesh → 30, PlotStyle → {Cyan}]
```
сітка стиль графіка блакитний
```
Plot3D[{y3Q[δ, noptQ, V]}, {δ, x10 - dx1, x10 + dx1}, {V, x30 - dx3, x30 + dx3},
```
графік функції 2–х змінних
```
 AxesLabel → {"δ, мм  ", "V, м/с  ", "Q, кг/год  "},
```
позначення на осях
```
 LabelStyle → Directive[FontSize → 14, FontFamily → "Times", PlotLegends → "Expressions"],
```
стиль помітки директива розмір шрифту сімейство шрифту легенди графіка
```
 Mesh → 30, PlotStyle → {Cyan}]
```
сітка стиль графіка блакитний

Програмний код в Wolfram Cloud для статистичного аналізу залежності потужності P, що споживається розробленою машиною для очищення насіння рицини

```
MP = {{1, 1, 0, 1891.6}, {1, -1, 0, 1484}, {-1, 1, 0, 2540.7}, {-1, -1, 0, 1984.6},
   {0, 0, 0, 1928}, {1, 0, 1, 1825.9}, {1, 0, -1, 1452.3}, {-1, 0, 1, 2388.8},
   {-1, 0, -1, 2042.1}, {0, 0, 0, 1980.3}, {0, 1, 1, 2395.5}, {0, 1, -1, 2012.8},
   {0, -1, 1, 1928.6}, {0, -1, -1, 1552}, {0, 0, 0, 1982.3}};
x10 = 10;
dx1 = 10;
x20 = 300;
dx2 = 100;
x30 = 4;
dx3 = 2;
y1P[x1_, x2_, x3_] = 1963.53333333333 - 287.8 x1 + 236.425 x2 + 184.95 x3 - 37.125 x1 x2 +
   6.72499999999997 x1 x3 + 1.52500000000003 x2 x3 - 16.6291666666673 x1 x1 + 28.320833333333 x2 x2 +
   -19.6291666666668 x3 x3;
y2P[x1_, x2_, x3_] = 1963.53333333333 - 287.8 x1 + 236.425 x2 + 184.95 x3 - 37.125 x1 x2 +
   0 x1 x3 + 0 x2 x3 + 0 x1 x1 + 28.320833333333 x2 x2 + 0 x3 x3;
y3P[x1_, x2_, x3_] = y2P[(x1 - 10) / 10, (x2 - 300) / 100, (x3 - 4) / 2];
X = {1, x1, x2, x3, x1 * x2, x1 * x3, x2 * x3, x1^2, x2^2, x3^2};
y0P[x1_, x2_, x3_] = Fit[MP, X, {x1, x2, x3}];
```
узгодити
```
y0P[x1, x2, x3]
y1P[x1, x2, x3]
y2P[x1, x2, x3]
Simplify[y3P[δ, n, V]]
```
спростити
```
nlmP = NonlinearModelFit[MP, a00 + a10 * x1 + a20 * x2 + a30 * x3 + a12 * x1 * x2 + a13 * x1 * x3 +
```
нелінійна регресія
```
    a23 * x2 * x3 + a11 * x1^2 + a22 * x2^2 + a33 * x3^2,
   {a00, a10, a20, a30, a12, a13, a23, a11, a22, a33 }, {x1, x2, x3}];
nlmP["ParameterTable"]
nlmP["ANOVATable"]
nlmP["RSquared"]
```

```
OptP = FindMinimum[{y3P[δ, n, V], x10 - dx1 ≤ δ ≤ x10 + dx1, x20 - dx2 ≤ n ≤ x20 + dx2,
        знайти мінімум
    x30 - dx3 ≤ V ≤ x30 + dx3}, {δ, x10 - dx1}, {n, x20 - dx2}, {V, x30 - dx3}]
δoptP = δ /. Last[OptP];
                останній
noptP = n /. Last[OptP];
                останній
VoptP = V /. Last[OptP];
                останній
Plot3D[{y3P[δ, n, VoptP]}, {δ, x10 - dx1, x10 + dx1}, {n, x20 - dx2, x20 + dx2},
графік функції 2–х змінних
 AxesLabel → {"δ, мм  ", "n, об/хв  ", "P, Вт     "},
 позначення на осях
 LabelStyle → Directive[FontSize → 14, FontFamily → "Times", PlotLegends → "Expressions"],
 стиль помітки   директива   розмір шрифту   сімейство шрифту   легенди графіка
 Mesh → 30, PlotStyle → {Orange}]
 сітка   стиль графіка   помаранчевий
Plot3D[{y3P[δ optP, n, V]}, {n, x20 - dx2, x20 + dx2}, {V, x30 - dx3, x30 + dx3},
графік функції 2–х змінних
 AxesLabel → {"n, об/хв  ", "V, м/с  ", "P, Вт    "},
 позначення на осях
 LabelStyle → Directive[FontSize → 14, FontFamily → "Times", PlotLegends → "Expressions"],
 стиль помітки   директива   розмір шрифту   сімейство шрифту   легенди графіка
 Mesh → 30, PlotStyle → {Orange}]
 сітка   стиль графіка   помаранчевий
Plot3D[{y3P[δ, n optP, V]}, {δ, x10 - dx1, x10 + dx1}, {V, x30 - dx3, x30 + dx3},
графік функції 2–х змінних
 AxesLabel → {"δ, мм  ", "V, м/с  ", "P, Вт     "},
 позначення на осях
 LabelStyle → Directive[FontSize → 14, FontFamily → "Times", PlotLegends → "Expressions"],
 стиль помітки   директива   розмір шрифту   сімейство шрифту   легенди графіка
 Mesh → 30, PlotStyle → {Orange}]
```

Програмний код в Wolfram Cloud для статистичного аналізу залежності питомих витрат електроенергії E розробленою машиною для очищення насіння рицини

```
ME = {{1, 1, 0, 0.037685445489762}, {1, -1, 0, 0.0337485786481364}, {-1, 1, 0, 0.0872759541984733},
    {-1, -1, 0, 0.0778274509803921}, {0, 0, 0, 0.043003717472119}, {1, 0, 1, 0.0329816357250376},
    {1, 0, -1, 0.0269777089783282}, {-1, 0, 1, 0.0734387702818104}, {-1, 0, -1, 0.0648857899382171},
    {0, 0, 0, 0.042903717472119}, {0, 1, 1, 0.057530353569046}, {0, 1, -1, 0.0493938650306749},
    {0, -1, 1, 0.0522813253012048}, {0, -1, -1, 0.0438555729984301}, {0, 0, 0, 0.040503717472119}};
x10 = 10;
dx1 = 10;
x20 = 300;
dx2 = 100;
x30 = 4;
dx3 = 2;
y1E[x1_, x2_, x3_] = 0.0421370508054523 + -0.0215043245697036 x1 + 0.00302158629497408 x2 +
    0.00388989349143107 x3 + -0.00137790909411389 x1 x2 + -0.000637263399220957 x1 x3 +
    -7.23159411008777 E - 05 x2 x3 + 0.00790150176487401 x1 x1 + 0.00909580475886462 x2 x2 +
```

```
y2E[x1_, x2_, x3_] = 0.0421370508054523 + -0.0215043245697036 x1 + 0.00302158629497408 x2 +
    0.00388989349143107 x3 + -0.00137790909411389 x1 x2 + 0 x1 x3 + 0 x2 x3 + 0.00790150176487401 x1 x1 +
    0.00909580475886462 x2 x2 + 0 x3 x3;
y3E[x1_, x2_, x3_] = y2E[(x1 - 10) / 10, (x2 - 300) / 100, (x3 - 4) / 2];
X = {1, x1, x2, x3, x1 * x2, x1 * x3, x2 * x3, x1^2, x2^2, x3^2};
y0E[x1_, x2_, x3_] = Fit[ME, X, {x1, x2, x3}];
                     узгодити
y0E[x1, x2, x3]
y1E[x1, x2, x3]
y2E[x1, x2, x3]
Simplify[y3E[δ, n, V]]
спростити
nlmE = NonlinearModelFit[ME, a00 + a10 * x1 + a20 * x2 + a30 * x3 + a12 * x1 * x2 + a13 * x1 * x3 +
       нелінійна регресія
    a23 * x2 * x3 + a11 * x1^2 + a22 * x2^2 + a33 * x3^2,
   {a00, a10, a20, a30, a12, a13, a23, a11, a22, a33}, {x1, x2, x3}];
nlmE["ParameterTable"]
nlmE["ANOVATable"]
nlmE["RSquared"]
OptE = FindMinimum[{y3E[δ, n, V], x10 - dx1 ≤ δ ≤ x10 + dx1, x20 - dx2 ≤ n ≤ x20 + dx2,
       знайти мінімум
   x30 - dx3 ≤ V ≤ x30 + dx3}, {δ, x10 - dx1}, {n, x20 - dx2}, {V, x30 - dx3}]
δoptE = δ /. Last[OptE];
                останній
noptE = n /. Last[OptE];
                останній
VoptE = V /. Last[OptE];
                останній
Plot3D[{y3E[δ, n, VoptE]}, {δ, x10 - dx1, x10 + dx1}, {n, x20 - dx2, x20 + dx2},
графік функції 2-х змінних
  AxesLabel → {"δ, мм  ", "n, об/хв  ", "E, МДж/кг  "},
  позначення на осях
  LabelStyle → Directive[FontSize → 14, FontFamily → "Times", PlotLegends → "Expressions"],
  стиль помітки  директива  розмір шрифту  сімейство шрифту  легенди графіка
  Mesh → 30, PlotStyle → {Gray}]
  сітка  стиль графіка  сірий
Plot3D[{y3E[δoptE, n, V]}, {n, x20 - dx2, x20 + dx2}, {V, x30 - dx3, x30 + dx3},
графік функції 2-х ···  експонента
  AxesLabel → {"n, об/хв  ", "V, м/с  ", "E, МДж/кг  "},
  позначення на осях
  LabelStyle → Directive[FontSize → 14, FontFamily → "Times", PlotLegends → "Expressions"],
  стиль помітки  директива  розмір шрифту  сімейство шрифту  легенди графіка
  Mesh → 30, PlotStyle → {Gray}]
  сітка  стиль графіка  сірий
Plot3D[{y3E[δ, noptE, V]}, {δ, x10 - dx1, x10 + dx1}, {V, x30 - dx3, x30 + dx3},
графік функції 2-х змі···  експонента
  AxesLabel → {"δ, мм  ", "V, м/с  ", "E, МДж/кг  "},
  позначення на осях
  LabelStyle → Directive[FontSize → 14, FontFamily → "Times", PlotLegends → "Expressions"],
  стиль помітки  директива  розмір шрифту  сімейство шрифту  легенди графіка
  Mesh → 30, PlotStyle → {Gray}]
  сітка  стиль графіка  сірий
```

Програмний код в Wolfram Cloud для статистичного аналізу залежності частки нерозлущених плодів (сегментів) ξ_f

```
Mξ = {{1, 1, 0, 0.2087}, {1, -1, 0, 0.16675}, {-1, 1, 0, 0.07005}, {-1, -1, 0, 0.0651},
   {0, 0, 0, 0.0962}, {1, 0, 1, 0.12645}, {1, 0, -1, 0.12765}, {-1, 0, 1, 0.00720000000000003},
   {-1, 0, -1, 0.00830000000000002}, {0, 0, 0, 0.0932}, {0, 1, 1, 0.16915}, {0, 1, -1, 0.16875},
   {0, -1, 1, 0.14445}, {0, -1, -1, 0.14655}, {0, 0, 0, 0.0952}};
x10 = 10;
dx1 = 10;
x20 = 300;
dx2 = 100;
x30 = 4;
dx3 = 2;
y1ξ[x1_, x2_, x3_] = 0.0948666666666667 + 0.0598625 x1 + 0.011725 x2 + -0.000500000000000004 x3 +
   0.00925 x1 x2 + -2.50000000000025 E - 05 x1 x3 + 0.000625000000000001 x2 x3 +
                                                  експонента
   -0.0285208333333333 x1 x1 + 0.0613041666666667 x2 x2 + 0.00105416666666666 x3 x3;
y2ξ[x1_, x2_, x3_] = 0.0948666666666667 + 0.0598625 x1 + 0.011725 x2 + 0 x3 + 0.00925 x1 x2 +
   0 x1 x3 + 0 x2 x3 + -0.0285208333333333 x1 x1 + 0.0613041666666667 x2 x2 + 0 x3 x3;
y3ξ[x1_, x2_, x3_] = y2ξ[(x1 - 10) / 10, (x2 - 300) / 100, (x3 - 4) / 2];
X = {1, x1, x2, x3, x1 * x2, x1 * x3, x2 * x3, x1 ^ 2, x2 ^ 2, x3 ^ 2};
y0ξ[x1_, x2_, x3_] = Fit[Mξ, X, {x1, x2, x3}];
                     узгодити
y0ξ[x1, x2, x3]
y1ξ[x1, x2, x3]
y2ξ[x1, x2, x3]
Simplify[y3ξ[δ, n, V]]
спростити
nlmξ = NonlinearModelFit[Mξ, a00 + a10 * x1 + a20 * x2 + a30 * x3 + a12 * x1 * x2 + a13 * x1 * x3 +
       нелінійна регресія
    a23 * x2 * x3 + a11 * x1^2 + a22 * x2^2 + a33 * x3^2,
   {a00, a10, a20, a30, a12, a13, a23, a11, a22, a33 }, {x1, x2, x3}];
nlmξ["ParameterTable"]
nlmξ["ANOVATable"]
nlmξ["RSquared"]
Optξ = FindMinimum[{y3ξ[δ, n, V], x10 - dx1 ≤ δ ≤ x10 + dx1, x20 - dx2 ≤ n ≤ x20 + dx2,
       знайти мінімум
   x30 - dx3 ≤ V ≤ x30 + dx3}, {δ, x10 - dx1}, {n, x20 - dx2}, {V, x30 - dx3}]
δoptξ = δ /. Last[Optξ];
              останній
noptξ = n /. Last[Optξ];
              останній
Voptξ = V /. Last[Optξ];
              останній
Plot3D[{y3ξ[δ, n, Voptξ]}, {δ, x10 - dx1, x10 + dx1}, {n, x20 - dx2, x20 + dx2},
графік функції 2-х змінних
 AxesLabel → {"δ, мм  ", "n, об/хв  ", "ξf  "},
 позначення на осях
 LabelStyle → Directive[FontSize → 14, FontFamily → "Times", PlotLegends → "Expressions"],
 стиль помітки   директива   розмір шрифту   сімейство шрифту   легенди графіка
 Mesh → 30, PlotStyle → {Magenta}]
 сітка   стиль графіка   малиновий
```

```
Plot3D[{y3ξ[δoptξ, n, V]}, {n, x20 - dx2, x20 + dx2}, {V, x30 - dx3, x30 + dx3},
```
графік функції 2–х змінних
```
 AxesLabel → {"n, об/хв  ", "V, м/с  ", "ξf  "},
```
позначення на осях
```
 LabelStyle → Directive[FontSize → 14, FontFamily → "Times", PlotLegends → "Expressions"],
```
стиль помітки директива розмір шрифту сімейство шрифту легенди графіка
```
 Mesh → 30, PlotStyle → {Magenta}]
```
сітка стиль графіка малиновий
```
Plot3D[{y3ξ[δ, noptξ, V]}, {δ, x10 - dx1, x10 + dx1}, {V, x30 - dx3, x30 + dx3},
```
графік функції 2–х змінних
```
 AxesLabel → {"δ, мм  ", "V, м/с  ", "ξf  "},
```
позначення на осях
```
 LabelStyle → Directive[FontSize → 14, FontFamily → "Times", PlotLegends → "Expressions"],
```
стиль помітки директива розмір шрифту сімейство шрифту легенди графіка
```
 Mesh → 30, PlotStyle → {Magenta}]
```
сітка стиль графіка малиновий

Програмний код в Wolfram Cloud для статистичного аналізу залежності вмісту ліквідного насіння у забірнику насіння $\psi_{s\text{-}s}$

```
Mψ = {{1, 1, 0, 0.95489296}, {1, -1, 0, 0.98009296}, {-1, 1, 0, 0.89624496},
   {-1, -1, 0, 0.84508496}, {0, 0, 0, 0.95902896}, {1, 0, 1, 0.99193296}, {1, 0, -1, 0.97925296},
   {-1, 0, 1, 0.89260496}, {-1, 0, -1, 0.88992496}, {0, 0, 0, 0.95402896}, {0, 1, 1, 0.95750896},
   {0, 1, -1, 0.94232896}, {0, -1, 1, 0.94452896}, {0, -1, -1, 0.92934896}, {0, 0, 0, 0.95902896}};
x10 = 10;
dx1 = 10;
x20 = 300;
dx2 = 100;
x30 = 4;
dx3 = 2;
y1ψ[x1_, x2_, x3_] = 0.957362293333333 + 0.047789 x1 + 0.00649 x2 + 0.005715 x3 +
   -0.0190899999999999 x1 x2 + 0.00250000000000003 x1 x3 + -2.77555756156289 E - 17 x2 x3 +
                                                                    експонента
   -0.0216416666666664 x1 x1 + -0.0166416666666663 x2 x2 + 0.00270833333333387 x3 x3;
y2ψ[x1_, x2_, x3_] = 0.957362293333333 + 0.047789 x1 + 0.00649 x2 + 0.005715 x3 +
   -0.0190899999999999 x1 x2 + 0.00250000000000003 x1 x3 + 0 x2 x3 + -0.0216416666666664 x1 x1 +
   -0.0166416666666663 x2 x2 + 0.00270833333333387 x3 x3;
y3ψ[x1_, x2_, x3_] = y2ψ[(x1 - 10) / 10, (x2 - 300) / 100, (x3 - 4) / 2];
X = {1, x1, x2, x3, x1 * x2, x1 * x3, x2 * x3, x1 ^ 2, x2 ^ 2, x3 ^ 2};
y0ψ[x1_, x2_, x3_] = Fit[Mψ, X, {x1, x2, x3}];
                     узгодити
y0ψ[x1, x2, x3]
y1ψ[x1, x2, x3]
y2ψ[x1, x2, x3]
Simplify[y3ψ[δ, n, V]]
```
спростити
```
nlmψ = NonlinearModelFit[Mψ, a00 + a10 * x1 + a20 * x2 + a30 * x3 + a12 * x1 * x2 + a13 * x1 * x3 +
```
нелінійна регресія
```
    a23 * x2 * x3 + a11 * x1^2 + a22 * x2^2 + a33 * x3^2,
   {a00, a10, a20, a30, a12, a13, a23, a11, a22, a33 }, {x1, x2, x3}];
nlmψ["ParameterTable"]
```

```
nlmψ["ANOVATable"]
nlmψ["RSquared"]
Optψ = FindMaximum[{y3ψ[δ, n, V], x10 - dx1 ≤ δ ≤ x10 + dx1, x20 - dx2 ≤ n ≤ x20 + dx2,
        знайти максимум
    x30 - dx3 ≤ V ≤ x30 + dx3}, {δ, x10 - dx1}, {n, x20 - dx2}, {V, x30 - dx3}]
δoptψ = δ /. Last[Optψ];
                останній
noptψ = n /. Last[Optψ];
                останній
Voptψ = V /. Last[Optψ];
                останній
Plot3D[{y3ψ[δ, n, Voptψ]}, {δ, x10 - dx1, x10 + dx1}, {n, x20 - dx2, x20 + dx2},
графік функції 2-х змінних
  AxesLabel → {"δ, мм  ", "n, об/хв  ", "ψs-s  "},
  позначення на осях
  LabelStyle → Directive[FontSize → 14, FontFamily → "Times", PlotLegends → "Expressions"],
  стиль помітки  директива  розмір шрифту  сімейство шрифту  легенди графіка
  Mesh → 30, PlotStyle → {Yellow}]
  сітка  стиль графіка  жовтий
Plot3D[{y3ψ[δoptψ, n, V]}, {n, x20 - dx2, x20 + dx2}, {V, x30 - dx3, x30 + dx3},
графік функції 2-х змінних
  AxesLabel → {"n, об/хв  ", "V, м/с  ", "ψs-s  "},
  позначення на осях
  LabelStyle → Directive[FontSize → 14, FontFamily → "Times", PlotLegends → "Expressions"],
  стиль помітки  директива  розмір шрифту  сімейство шрифту  легенди графіка
  Mesh → 30, PlotStyle → {Yellow}]
  сітка  стиль графіка  жовтий
Plot3D[{y3ψ[δ, noptψ, V]}, {δ, x10 - dx1, x10 + dx1}, {V, x30 - dx3, x30 + dx3},
графік функції 2-х змінних
  AxesLabel → {"δ, мм  ", "V, м/с  ", "ψs-s  "},
  позначення на осях
  LabelStyle → Directive[FontSize → 14, FontFamily → "Times", PlotLegends → "Expressions"],
  стиль помітки  директива  розмір шрифту  сімейство шрифту  легенди графіка
  Mesh → 30, PlotStyle → {Yellow}]
  сітка  стиль графіка  жовтий
```

Оптимізація параметрів машини для очищення насіння рицини

```
EE[δ_, n_, V_] := 0.13242684681968545` + 9.09580475886462`*^-7 n^2 + 0.001944946745715535` V +
   n (-0.0005017533316409974` - 1.37790909411389`*^-6 δ) - 0.003317360081710995` δ +
   0.0000790150176487401` δ^2;
ξf[δ_, n_, V_] := 0.5507958333333337` + 6.130416666666671`*^-6 n^2 +
   n (-0.0036535000000000022` + 9.250000000000001`*^-6 δ) + 0.00891541666666666` δ -
   0.000285208333333333` δ^2;
ψss[δ_, n_, V_] := 0.6658199600000058` - 1.6641666666666303`*^-6 n^2 + 0.0006770833333334675` V^2 +
   n (0.0012542999999999773` - 0.0000190899999999999` δ) +
   V (-0.003809166666667755` + 0.0001250000000000015` δ) + 0.014334233333333245` δ -
   0.00021641666666666397` δ^2;
QQ[δ_, n_, V_] := -110.28053376222121` + 1.439028635999994` n - 0.00224804905999999` n^2 +
   4.938524990222197` δ - 0.0568829153999988` δ^2;
PP[δ_, n_, V_] := 1315.670833333327` + 0.0028320833333333` n^2 + 92.475` V +
   n (1.03625000000002` - 0.037125000000000005` δ) - 17.6425` δ;

x10 = 10;
dx1 = 10;
x20 = 300;
```

```
dx2 = 100;
x30 = 4;
dx3 = 2;
OptEEMin =
 FindMinimum[{EE[x1, x2, x3], x10 - dx1 ≤ x1 ≤ x10 + dx1, x20 - dx2 ≤ x2 ≤ x20 + dx2, x30 - dx3 ≤ x3 ≤ x30 + dx3},
 знайти мінімум
  {x1, x10 - 0 dx1}, {x2, x20 - 0 dx2}, {x3, x30 - 0 dx3}]
EEMin = First[OptEEMin];
        перший
OptEEMax =
 FindMaximum[{EE[x1, x2, x3], x10 - dx1 ≤ x1 ≤ x10 + dx1, x20 - dx2 ≤ x2 ≤ x20 + dx2, x30 - dx3 ≤ x3 ≤ x30 + dx3},
 знайти максимум
  {x1, x10 - 0 dx1}, {x2, x20 - 0 dx2}, {x3, x30 - 0 dx3}]
EEMax = First[OptEEMax];
        перший
OptξfMin =
 FindMinimum[{ξf[x1, x2, x3], x10 - dx1 ≤ x1 ≤ x10 + dx1, x20 - dx2 ≤ x2 ≤ x20 + dx2, x30 - dx3 ≤ x3 ≤ x30 + dx3},
 знайти мінімум
  {x1, x10 - 0 dx1}, {x2, x20 - 0 dx2}, {x3, x30 - 0 dx3}]
ξfMin = First[OptξfMin];
        перший
OptξfMax =
 FindMaximum[{ξf[x1, x2, x3], x10 - dx1 ≤ x1 ≤ x10 + dx1, x20 - dx2 ≤ x2 ≤ x20 + dx2, x30 - dx3 ≤ x3 ≤ x30 + dx3},
 знайти максимум
  {x1, x10 - 0 dx1}, {x2, x20 - 0 dx2}, {x3, x30 - 0 dx3}]
ξfMax = First[OptξfMax];
        перший
OptψssMin =
 FindMinimum[{ψss[x1, x2, x3], x10 - dx1 ≤ x1 ≤ x10 + dx1, x20 - dx2 ≤ x2 ≤ x20 + dx2, x30 - dx3 ≤ x3 ≤ x30 + dx3},
 знайти мінімум
  {x1, x10 - 0 dx1}, {x2, x20 - 0 dx2}, {x3, x30 - 0 dx3}]
ψssMin = First[OptψssMin];
         перший
OptψssMax =
 FindMaximum[{ψss[x1, x2, x3], x10 - dx1 ≤ x1 ≤ x10 + dx1, x20 - dx2 ≤ x2 ≤ x20 + dx2, x30 - dx3 ≤ x3 ≤ x30 + dx3},
 знайти максимум
  {x1, x10 - 0 dx1}, {x2, x20 - 0 dx2}, {x3, x30 - 0 dx3}]
ψssMax = First[OptψssMax];
         перший
KK[x1_, x2_, x3_] := ((EEMax - EE[x1, x2, x3]) / (EEMax - EEMin)) *
    ((ξfMax - ξf[x1, x2, x3]) / (ξfMax - ξfMin)) *
    ((ψss[x1, x2, x3] - ψssMin) / (ψssMax - ψssMin));
Opt = FindMaximum[{KK[x1, x2, x3],
      знайти максимум
   x10 - dx1 ≤ x1 ≤ x10 + dx1, x20 - dx2 ≤ x2 ≤ x20 + dx2, x30 - dx3 ≤ x3 ≤ x30 + dx3}, {x1, x10 - dx1},
  {x2, x20 + 0 dx2}, {x3, x30 + 1 dx3}]
x1opt = x1 /. Last[Opt];
                останній
x2opt = x2 /. Last[Opt];
                останній
x3opt = x3 /. Last[Opt];
                останній
EE[x1opt, x2opt, x3opt]
ξf[x1opt, x2opt, x3opt]
ψss[x1opt, x2opt, x3opt]
QQ[x1opt, x2opt, x3opt]
PP[x1opt, x2opt, x3opt]
```

Додаток Г

ЗАТВЕРДЖУЮ
В. о. директора Інституту олійних культур Національної академії аграрних наук України (ІОК НААН)
_____ П. Ф. Балабай
«15» грудня 2025 р.

Акт
про впровадження результатів науково роботи (НР)

В Інституті олійних культур Національної академії аграрних наук України (ІОК НААН) проведено експериментальні дослідження в межах наукової роботи БМ-27/2025 «Інтенсифікація техніко-технологічного забезпечення процесів переробки насіння малопоширених (нішевих) олійних культур» (№ДР 0125U000488), яка виконується в Дніпровському державному аграрно-економічному університеті. Виконавцями зазначеної наукової роботи є професор кафедри інжинірингу технічних систем, д.т.н., старш. дослід. Алієв Е.Б. та аспірант Головченко В.В. (науковий керівник – к.т.н., доцент Теслюк Г. В.).

У ході досліджень проведено серію лабораторних і напівпромислових випробувань дослідного зразка машини для очищення насіння рицини сорту Хортицька 3, розробленої з урахуванням морфологічних особливостей і фізико-механічних властивостей насіння цієї культури.

За результатами експериментальних досліджень процесу відокремлення та очищення насіння рицини отримано аналітичні та експериментальні залежності: продуктивності машини Q, споживаної потужності P. питомих витрат електроенергії E, частки нерозлущених плодів (сегментів) ξ_f, вмісту ліквідного насіння у забірнику $\psi_{s\text{-}s}$ від основних конструктивно-режимних параметрів, а саме: відстані між зворотним і дробильним конусами δ, частоти обертання дробильного конусу n та швидкості повітряного потоку V. Встановлені оптимальні поєднання значень факторів: δ = 10,8 мм, n = 282 об/хв, V = 3,6 м/с, які забезпечують максимальну ефективність процесу з урахуванням сукупності технологічних і енергетичних критеріїв, а саме: E = 0,0394 МДж/кг, Q = 163,4 кг/год, P = 1861 Вт, ξ_f = 0,099, $\psi_{s\text{-}s}$ = 0,958. Отримані результати підтверджують доцільність і перспективність впровадження запропонованої конструкції машини для очищення насіння рицини у виробничу практику.

Результати дослідження будуть використані:

- під час підготовки насіннєвого матеріалу рицини в умовах виробництва ІОК НААН;
- при удосконаленні технологічних схем післязбиральної доробки насіння нішевих олійних культур;

– у навчальному процесі при підготовці докторів філософії ОНП «Олійні культури» зі спеціальності Н1 Агрономія;

– при подальших наукових дослідженнях, спрямованих на підвищення ефективності технічних засобів переробки олійних культур.

Проведена робота сприяє розширенню використання рицини як перспективної нішевої культури для виробництва технічних і фармацевтичних олій та розвитку вітчизняної галузі переробки олійних культур.

Заступник директора з наукової роботи
канд. біол. наук, старш. наук. співр. _____ Катерина ВЕДМЕДЄВА

Завідувач відділу агротехнології та
впровадження, гарант
ОНП «Олійні культури»,
д-р с.-г. наук, старш. наук. співр. _____ Олександр ПОЛЯКОВ

ЗАТВЕРДЖУЮ
Перший проректор – проректор з навчальної роботи Дніпровського державного аграрно-економічного університету (ДДАЕУ),
канд. с.-г. наук, проф.
_____ Дмитро ОНОПРІЄНКО
м.п.
«1» вересня 2023 р.

А К Т
про використання результатів дисертації
на здобуття освітньо-наукового ступеня доктора філософії
Головченко Валентина Володимировича
«Обґрунтування конструктивно-технологічних параметрів машини для очищення насіння рицини»
у навчальному процесі кафедри тракторів і сільськогосподарських машин ДДАЕУ

Комісія у складі: голова – декан інженерно-технологічного факультету ДДАЕУ, д-р наук з держ. управ., проф. Пугач А.М. та членів – в.о. завідувача кафедри тракторів і сільськогосподарських машин ДДАЕУ, канд. техн. наук, доц. Теслюк Г.В., доцентка кафедри тракторів і сільськогосподарських машин ДДАЕУ, канд. техн. наук, доц. Золотовська О.В. підтверджує впровадження науково-практичних результатів дисертаційної роботи на здобуття освітньо-наукового ступеня доктора філософії аспірантом Головченко Валентином Володимировичем: «Обґрунтування конструктивно-технологічних параметрів машини для очищення насіння рицини» у навчальному процесі кафедри тракторів і сільськогосподарських машин ДДАЕУ та констатує, що аспірантом Головченко В.В. впроваджено в курс дисципліни «Сільськогосподарські машини» для студентів освітнього рівня бакалавр за спеціальністю 208 (Н7) – Агроінженерія наступне:

– практичні заняття з використанням дослідної установки для очищення насіння рицини;
– методики проведення лабораторних і напівпольових випробувань;
– аналіз конструктивно-технологічних параметрів машини та їх впливу на ефективність процесу очищення насіння;
– застосування регресійного та експериментального підходів для визначення оптимальних режимів роботи установки;
– оцінка енергетичних та технологічних показників роботи машини.

Мета роботи – формування у студентів практичних навичок застосування наукових підходів до обґрунтування конструктивно-технологічних параметрів машини для очищення насіння рицини, підвищення ефективності навчально-лабораторних процесів та впровадження результатів наукових досліджень у практичну підготовку фахівців.

Матеріальне забезпечення – дослідна установка для очищення насіння рицини та методики випробувань, розроблені відповідно до дисертаційної роботи аспіранта Головченко В.В.

Голова комісії:

декан інженерно-технологічного
факультету ДДАЕУ,
д-р наук з держ. управ., проф. Андрій ПУГАЧ

Члени комісії:

в.о. завідувача кафедри тракторів і
сільськогосподарських машин ДДАЕУ,
канд. техн. наук, доц. Геннадій ТЕСЛЮК

доцентка кафедри тракторів і
сільськогосподарських машин ДДАЕУ,
канд. техн. наук, доц. Олена ЗОЛОТОВСЬКА

ЗАТВЕРДЖУЮ
Проректор з наукової та інноваційної діяльності ДДАУ
д-р с.-г. наук, професор
_____ Юрій КАЛЕНІК
«14» квітня 2025 р.

ЗАТВЕРДЖУЮ
Директор СФГ «Зоря»
_____ Анатолій БАТЮК
«14» квітня 2025 р.

А К Т
про виробничу перевірку

Ми, що нижче підписалися, представники Дніпровського державногоаграрно-економічного університету:здобувач третього освітньо-наукового рівня вищої освіти ОНП «Галузеве машинобудування»Головченко Валентинта професор кафедри інжинірингу технічних систем, доктор технічних наук, старший дослідник Алієв Ельчин, з однієї сторони, та директорСелянського (фермерського) господарства «ЗОРЯ»(ЄДРПОУ 23079916,Дніпропетровська обл., Петриківський р-н, смт Петриківка, пров. Грушевий, буд. 7) – агрономБатюк Анатолій, з другої сторони,склали цей акт про те, що експериментальний зразок машини для очищення насіння рицини, розроблений у межах наукових дослідженьБМ-27/2025 «Інтенсифікація техніко-технологічного забезпечення процесів переробки насіння малопоширених (нішевих) олійних культур» (№ ДР 0125U000488), пройшов виробничу перевірку під час очищення насіння рицини сорту «Хортицька 3».

Дата проведення перевірки: 19 лютого 2024 року.

Місце проведення:Дніпропетровська обл., Петриківський р-н, смт Петриківка.

Виробнича перевірка здійснювалася в умовах діючого сільськогосподарського підприємства з дотриманням вимог охорони праці, техніки безпеки та чинних виробничих регламентів.

Розлущування плодів та очищення насіння проводилися на партії післязбиральної рицини (630 кг) з початковою засміченістю (0,14) і вологістю (7–8%), характерною для виробничих умов господарства. Машина працювала в безперервному режимі з регулюванням основних конструктивно-режимних параметрів відповідно до затвердженої програми випробувань.

Під час виробничої перевірки встановлено такі показники роботи машини:продуктивність – 170 кг/год;споживана потужність – 1,9 кВт;частка нерозлущених плодів – 0,12;частка втрат ліквідного насіння – 0,05.

Отримані результати підтверджують працездатність, ефективність і технологічну доцільність запропонованої конструкції машини для очищення

насіння рицини та свідчать про можливість і доцільність її подальшого впровадження у виробничу практику сільськогосподарських підприємств.

Цей акт складено у двох примірниках, що мають однакову юридичну силу, по одному для кожної зі сторін.

Від ДДАЕУ
Професор кафедри інжинірингу технічних систем ДДАЕУ, д.т.н., старший дослідник
_____ Ельчин АЛІЄВ

Здобувач третього освітньо-наукового рівня вищої освіти ОНП «Галузеве машинобудування»
_____ Валентин ГОЛОВЧЕНКО

«14» квітня 2025 р..

Від СФГ «Зоря»
Директор
_____ Анатолій БАТЮК

«14» квітня 2025 р.

ЗАТВЕРДЖУЮ
Проректор з наукової та інноваційної діяльності Дніпровського державного аграрно-економічного університету (ДДАЕУ), д-р с.-г. наук, проф.
_____ Юрій КАЛІТКА
м.п.

ЗАТВЕРДЖУЮ
Директор ТОВ ВО «Восход»
_____ Олена ГУЛА
м.п.

А К Т
про впровадження/використання результатів науково-технічної роботи

Даним актом підтверджується, що результати наукової роботи, виконані здобувачем третього освітньо-наукового рівня вищої освіти ОНП «Галузеве машинобудування» Головченком Валентином, професором кафедри інжинірингу технічних систем Ельчином Алієвим та завідувачем кафедри тракторів і сільськогосподарських машин Геннадієм Теслюком, впроваджені та використані на виробництві ТОВ ВО «Восход» (ЄДРПОУ 31004424, 52340, Дніпропетровська обл., Криничанський р-н, с. Світлогірське).

ТОВ ВО «Восход» в особі інженера з налагодження та випробування Владислава Овдійєнка отримало технічну та конструкторську документацію на експериментальний зразок машини для очищення насіння рицини, розробленої відповідно до наукової роботи БМ-27/2025 «Інтенсифікація техніко-технологічного забезпечення процесів переробки насіння малопоширених (нішевих) олійних культур» (№ ДР 0125U000488).

Підприємство ТОВ ВО «Восход» зацікавлене у виготовленні дослідної партії машини для очищення насіння рицини в кількості 5 одиниць для проведення виробничих випробувань та подальшого серійного виробництва.

Підписаний акт не встановлює фінансових зобов'язань між сторонами. Фінансово-правові умови використання науково-технічної продукції визначаються окремими двосторонніми договорами між сторонами.

Від ДДАЕУ
Професор кафедри інжинірингу технічних систем ДДАЕУ,
д-р техн. наук, старш. дослідн.
_____ Ельчин АЛІЄВ

Завідувач кафедри тракторів і сільськогосподарських машин ДДАЕУ,
канд. техн. наук, доцент
_____ Геннадій ТЕСЛЮК

Здобувач третього освітньо-наукового рівня вищої освіти ОНП «Галузеве машинобудування»
_____ Валентин ГОЛОВЧЕНКО

«25» грудня 2025 р.

Від ТОВ ВО «Восход»
Інженер з налагодження й випробування
_____ Владислав ОВІДІЄНКО

«25» грудня 2025 р.

Додаток Д

Список публікацій здобувача,
в яких опубліковані основні наукові результати дисертації

Стаття у закордонному журналах, що індексуються в наукометричній базі Scopus:

1. Aliiev, E., **Holovchenko, V.**, Aliieva O. (2026). Research on the Optimal Design and Process Parameters of a Castor Seed Cleaning Machine. Research in Agricultural Engineering, 72(1): 41–58. https://doi.org/10.17221/121/2025-RAE

Статті у наукових фахових виданнях України за спеціальністю 133 Галузеве машинобудування:

2. Теслюк, Г.В., **Головченко, В.В.** (2025). Аналіз конструктивних особливостей машин для очищення насіння рицини. Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки, 11(42), I: 167–176. DOI: https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.11(42).1.167-178

3. Aliiev, E., **Holovchenko, V.** (2025). Results of laboratory studies on the physico-mechanical properties of castor fruits and seeds. Техніка, енергетика, транспорт АПК, 1 (128): 7–15. DOI: https://doi.org/10.37128/2520-6168-2025-1-1

4. Aliiev, E., **Holovchenko, V.** (2025). Results of experimental studies of a castor seed cleaning machine. Техніка, енергетика, транспорт АПК, 2 (129): 47–53 DOI: https://doi.org/10.37128/2520-6168-2025-2-6

5. Алієв, Е.Б., Теслюк, Г.В., **Головченко, В.В.** (2025). Чисельне моделювання машини для відокремлення і очищення насінин рицини від плодів. Сільськогосподарські машини, 51: 147–158. DOI: https://doi.org/10.36910/acm.vi51.1853

Статті у наукових фахових виданнях України за іншими спеціальностями:

6. Aliiev, E. B., Aliieva, O. Y., & **Holovchenko, V. V.** (2026). Verification of the rheological model of fracture of castor fruits and seeds based on experimental data. Scientific and Technical Bulletin of the Institute of Oilseed Crops NAAS, 40, 145-158. https://doi.org/10.36710/IOC-2026-40-12

Патенти України:

7. Алієв, Е.Б., **Головченко, В.В.** (2025). Патент на корисну модель України 161299, МПК (2025.01) B01D 45/00, B01D 45/18 (2006.01). Машина для очищення насіння рицини. Заявник: Дніпровський державний аграрно-економічний університет, № u 2025 03080. Заявл. 25.06.2025. Опубл. 19.11.2025, Бюл. № 47. URL: https://sis.nipo.gov.ua/uk/search/detail/1886373/

Тези і матеріали конференцій:

8. **Головченко, В.В.** (2024). Перспективи розробки машини для очищення насіння рицини. Збірник тез III Всеукраїнської науково-практичної конференції молодих вчених «Інжиніринг технологій і технічних систем агропромислового комплексу» (15 листопада 2024 р.). Частина 2. Інноваційні технології харчової промисловості. Дніпро, ДДАЕУ: 112–114.

9. Алієв, Е.Б., **Головченко, В.В.** (2025). Результати лабораторних досліджень фізико-механічних властивостей плодів рицини та його складових. Збірник тез доповідей X Міжнародної науково-практичної конференції «Інноваційні технології в АПК» (3-4 квітня 2025 р.). Луцьк, ЛНТУ: 6–8.

10. **Holovchenko, V.V.** (2025). Analysis of the technological line for castor seed production. Збірник тез Міжнародної наукової інтернет-конференції «Олійні культури: сьогодення та перспективи» (26 березня 2025 р.). Запоріжжя, ІОК НААН: 137–138.

11. **Головченко, В.В.** (2025). Класифікація машин для очищення і сепарації насіння рицини. Матеріали I Всеукраїнської науково-практичної конференції «Здобутки та перспективи розвитку харчової галузі» (30 травня 2025 р.). Дніпро. ДДАЕУ: 75–77.

12. Алієв, Е.Б., **Головченко, В.В.** (2025). Огляд технологій збирання і очищення рицини. Збірник матеріалів II Міжнародної науково–практичної конференції «Сучасні підходи до вирощування та використання малопоширених плодових, декоративних, ароматичних та лікарських рослин для покращення екологічної ситуації в Україні» (29 серпня 2025 р.). Одеса, ІКОСГ НААН: 65–68.

13. Алієв, Е.Б., **Головченко, В.В.** (2025). Розробка конструкції машини для очищення насіння рицини. Матеріали XX Міжнародної науково-практичної конференції «Технічний прогрес в АПК» (21–22 травня 2025 р.). Харків, ДБТУ: 103–105.

14. Алієв Е., **Головченко В.** (2025). Результати лабораторних досліджень реологічних властивостей плодів і насіння рицини. Збірник тез доповідей Міжнародної науково-практичної конференції «Інновації в агропромисловому комплексі, машинобудуванні та транспорті» (9–10 квітня 2025 року). Рівне, НУВГП: 71–74.

15. **Головченко, В.В.**, Алієв, Е.Б., Теслюк, Г.В. (2025). Результати експериментальних досліджень процесу відокремлення і очищення насіння рицини. Збірник тез доповідей XXVI Міжнародна наукова конференція «Сучасні проблеми землеробської механіки» (17–18 жовтня 2025 р.). Київ, НУБіП: 195–198.

16. **Головченко, В. В.** (2025). Теоретичні дослідження стиску плодів рицини під дією робочих органів машини. Інжиніринг технологій і технічних систем агропромислового комплексу. Збірник тез IV Всеукраїнської науково-практичної конференції молодих вчених (21 листопада 2025 р.). Частина 1. Інжиніринг технічних систем агропромислового виробництва. Дніпро. ДДАЕУ: 221–225.