

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ДНІПРОВСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ АГРАРНО-ЕКОНОМІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

ЛУПКО КРИСТИНА ОЛЕГІВНА

УДК 633.1+633.85–042.52:631.362 (043.5)

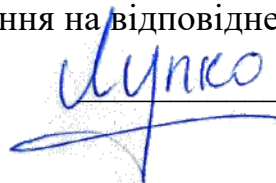
ДИСЕРТАЦІЯ

**ОБҐРУНТУВАННЯ КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ
СЕЛЕКЦІЙНО-НАСІННИЦЬКОГО ТРІЄРА ДЛЯ СЕПАРАЦІЇ НАСІННЯ
ДРІБНОНАСІННЄВИХ КУЛЬТУР**

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



Кристина ЛУПКО

Науковий керівник:

Алієв Ельчин Бахтияр огли, доктор
технічних наук, старший дослідник

Дніпро – 2023

АНОТАЦІЯ

Лушко К. О. Обґрунтування конструктивно-технологічних параметрів селекційно-насінницького трієра для сепарації насіння дрібнонасінневих культур. – 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, 2023.

Мета роботи полягає у підвищенні ефективності процесу сепарації насіннєвого матеріалу дрібнонасінневих культур шляхом розробки конструкції селекційно-насінницького трієра у складі мехатронної системи із обґрунтованими конструктивно-технологічними параметрами, що забезпечують задану прецизійність.

Об'єкт дослідження – технологічний процес сепарації насіннєвого матеріалу дрібнонасінневих культур на селекційно-насінницькому трієрі у складі мехатронної системи.

Предмет досліджень – насіннєвий матеріал дрібнонасінневих культур та умови і закономірності протікання технологічного процесу його сепарації за геометричними розмірами.

Методи досліджень. Дослідження базувалися на застосуванні чисельного моделювання з використанням основних принципів класичної механіки, газодинаміки, ймовірності, пружності, моделей дискретних елементів, багатофазної взаємодії та лагранжевої багатофазності. Для цього були використані методи диференційного та інтегрального числення. Експериментальні дослідження були проведені з використанням методу математичного планування, натурних спостережень та експертних оцінок, а обробка та аналіз результатів експериментів здійснювалися з використанням теорії ймовірності та кореляційно-регресійного аналізу. Моделювання та обробка результатів досліджень були виконані за допомогою програмних пакетів Simcenter Star-CCM+ та Wolfram Cloud.

Отримано аналітичні і експериментальні залежності у вигляді рівнянь регресії другого порядку вмісту домішок в насіннєвій суміші лотка і вмісту насіння основної дрібнонасінневої культури (гірчиця, рижій, ріпак) в насіннєвій суміші циліндра від його діаметра, частоти його обертання, тривалості його обертання проти і за годинниковою стрілкою, загальної тривалості обертання, кількості насінин і домішок в насіннєвій суміші, що уможливорює обґрунтування раціональних конструктивно-технологічних параметрів роботи селекційно-насінницького трієра.

Розроблено спосіб і алгоритм роботи мехатронної системи керування селекційно-насінницьким трієром, який базується на розпізнаванні траєкторії польоту насіння по відеозображенню і автоматичному встановленні лотка у визначене залежностями положення.

Отримано аналітичні залежності зміни кута відхилення центра мас компонента насіннєвої суміші від кута повороту і діаметра циліндра із чарунками селекційно-насінницького трієра, що уможливорює обґрунтування раціональних конструктивно-режимних параметрів його роботи.

Отримано аналітичні і експериментальні залежності зміни мінімального і максимального кутів виходу насіння дрібнонасінневих культур (гірчиці, рижію, ріпаку) з чарунок циліндра селекційно-насінницького трієра від його діаметра, частоти обертання, кількості насінин і домішок в насіннєвій суміші, що уможливорює обґрунтувати раціональні конструктивно-технологічні параметри його роботи.

Удосконалено комплекс прецизійного техніко-технологічного забезпечення процесів сепарації насіннєвого матеріалу дрібнонасінневих культур шляхом введення селекційно-насінницького трієра у складі мехатронної системи керування.

Представлений аналіз прецизійного техніко-технологічного забезпечення процесу сепарації насіннєвого матеріалу дрібнонасінневих культур за геометричними розмірами дає змогу стверджувати про необхідність удосконалення трієрних сепараторів базуючись на автоматизованому керуванні їх параметрами з використанням фото- або відео-фіксації процесу сепарації насіннєвого матеріалу із подальшою обробкою. Розроблено конструктивно-технологічну схему селекційно-насінницького трієра у складі мехатронної системи. Відмінність запропонованої

конструкції від традиційної полягає у фіксації фотокамерою траєкторії польоту насінин та обробці цієї інформації, що в подальшому дозволяє змінювати частоту обертання мотор-редуктора і як наслідок циліндра із чарунками, кут нахилу лотка, кут повороту заслінки із кроковим двигуном бункера-дозатора. Керування режимними параметрами селекційно-насінницького трієра дозволяє підлаштувати його до зміни складу насінневої суміші, що підвищує якість сепарації і зменшує втрати ліквідного насіння.

В результаті аналітичних досліджень процесу взаємодії компонентів насінневої суміші дрібнонасінневих культур із робочим органом селекційно-насінницького трієра отримано залежність куту відхилення центра мас компонента насінневої суміші від кута повороту циліндра. Отримана залежність дає змогу визначити мінімальний кут повороту циліндра із чарунками при якому починає обертатися компонент насінневої суміші відносно центра мас.

Розроблено модель процесу сепарації насінневого матеріалу дрібнонасінневих культур на селекційно-насінницькому трієрі в програмному пакеті Simcenter Star-CCM+. В результаті чисельного моделювання процесу сепарації насінневого матеріалу дрібнонасінневих культур на селекційно-насінницькому трієрі отримані залежності у вигляді рівнянь регресії другого порядку значень мінімального і максимального кутів виходу насіння з чарунок циліндра від факторів досліджень (діаметр циліндра, частота обертання циліндра, кількість насінин і домішок в насінневій суміші). За результатами моделювання отримані залежності у вигляді рівнянь регресії другого порядку кількості всіх компонентів і відносного вмісту домішок ϵ в насінневій суміші, яка знаходилася в межах мінімального і максимального кутів повороту циліндру трієра від факторів досліджень. Вирішуючи компромісну задачу в програмному пакеті Wolfram Cloud, яка зводиться до мінімізації відносного вмісту домішок ϵ і максимізації кількості всіх компонентів насінневої суміші, які знаходилися в межах мінімального і максимального кутів повороту циліндру, отримані раціональні конструктивно-технологічні параметри селекційно-насінницького трієрного сепаратора.

В результаті чисельного моделювання процесу сепарації насінневого матеріалу дрібнонасінневих культур на селекційно-насінницькому трієрі при змінній частоті обертання отримана динаміка зміни кількості насінин і домішок N_1 і відносного вмісту домішок в насінневій суміші лотка. В результаті чисельного моделювання процесу сепарації насінневого матеріалу дрібнонасінневих культур на селекційно-насінницькому трієрі при змінній частоті обертання отримані залежності кількості насінин і домішок відносного вмісту домішок в насінневій суміші лотка і умовної продуктивності трієра від тривалості обертання циліндру проти годинникової стрілки і за годинниковою стрілкою. Вирішуючи компромісну задачу в програмному пакеті Wolfram Cloud отримано раціональні режимні параметри трієрного сепаратора.

В результаті експериментальних досліджень селекційно-насінницького трієра у складі мехатронної системи та обробки отриманих даних були визначені залежності у вигляді рівнянь регресії другого порядку маси насінневої суміші в лотку, відносного вмісту домішок в насінневій суміші лотка, відносного вмісту насіння основної культури в насінневій суміші циліндра від частоти обертання циліндра n , тривалості його обертання проти і за годинниковою стрілкою, тривалості роботи. Вирішуючи компромісну задачу в програмному пакеті Wolfram Cloud отримано раціональні режимні параметри трієрного сепаратора.

Порівняння отриманих експериментальних даних з теоретичними показало, що отримані дані практично зійшлися. Це підтверджує статистичний аналіз з отриманими значеннями коефіцієнтів кореляції між теоретичними та експериментальними залежностями.

Спираючись на результати теоретичних і експериментальних досліджень розроблено спосіб і алгоритм роботи мехатронної системи керування селекційно-насінницьким трієром, який базується на удосконаленому програмному пакеті TracTrac, що дозволяє розпізнавати траєкторію польоту насіння по відеозображенню. Порівняння базової і удосконаленої (у складі мехатронної системи) конструкцій селекційно-насінницького трієра показало, що удосконалений трієр має більшу потужність 0,83 кВт і меншу продуктивність 123,5 кг/год.

Зменшення продуктивності пояснюється зміною напрямку обертання циліндра, але при цьому підвищується ефективність технологічного процесу сепарації насінневого матеріалу, оскільки знижується вміст домішок в насінневій суміші лотка $0,82 \pm 0,17 \%$ і вміст насіння основної культури в насінневій суміші циліндра $16,85 \pm 2,69 \%$.

У результаті проведення економічної оцінки встановлено, що запропонована удосконалена конструкція селекційно-насінницького трієра у складі мехатронної системи має більші капіталовкладення (до 40 %) і вищі затрати на його амортизацію, ремонт і технічне обслуговування (27 %). Економічний ефект досягається за рахунок зменшення втрат ліквідного насіння в процесі сепарації насінневої суміші (35,4 %). Питомий економічний ефект процесу сепарації насінневої суміші гірчиці масою 5000 кг складає 12,02 грн/кг, а строк окупності додаткових капіталовкладень складає 1,33 роки.

Селекційно-насінницький трієр для сепарації насіння дрібнонасінневих олійних культур у складі мехатронної системи впроваджено у виробництво ІОК НААН. ТОВ «Укрнасінняпром» прийняло для впровадження у виробництво науково-методичні рекомендації з налагодження трієрного сепаратора насінневого матеріалу дрібнонасінневих культур. Результати науково-технічної роботи у вигляді конструкторської та технічної документації селекційно-насінницького трієра впроваджені і використані на виробництві ТОВ НВО «Сортувальні машини» для виготовлення відповідного дослідного зразка. ТОВ «ВНІС ГЕНЕТИКС» отримало рекомендації з налагодження селекційно-насінницького трієра для сепарації, розділення і очищення насіння дрібнонасінневих олійних і зернових культур у вигляді відповідних математичних залежностей і конструктивно-технологічних схем.

Ключові слова: насіння, зерно, зернова суміш, домішки, ворох, сипкий матеріал, частинки, розділення, очищення, сепарація, сепарування, сортування, процес, технологічний комплекс, трієр, сепаратор, чисельне моделювання, параметри, установка, оцінка якості, метод дискретних елементів, автоматизація, мехатронна система, математична модель, симуляція, псевдорозріджений шар, концентрація, регресія, ефективність, управління, розрахунок, оптимізація, траєкторія.

ANNOTATION

Lupko K. O. Justification of the design and technological parameters of the selection and seed trier for the separation of seeds of small-seeded crops. – 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 – 2023.

The purpose of the work is to increase the efficiency of the process of separation of seed material of small-seeded crops by developing the design of a selection-seed trier as part of a mechatronic system with justified structural and technological parameters that ensure the specified precision.

The object of research is the technological process of the separation of seed material of small-seeded crops on a selection-seed trier as part of a mechatronic system.

The subject of research is the seed material of small-seeded crops and the conditions and regularities of the technological process of its separation according to geometric dimensions.

Research methods. The research was based on the application of numerical modeling using the basic principles of classical mechanics, gas dynamics, probability, elasticity, discrete element models, multiphase interaction and Lagrangian multiphase. For this, the methods of differential and integral calculus were used. Experimental studies were conducted using the method of mathematical planning, field observations and expert evaluations, and the processing and analysis of experimental results was carried out using probability theory and correlation-regression analysis. Modeling and processing of research results were performed using Simcenter Star-CCM+ and Wolfram Cloud software packages.

Analytical and experimental dependences were obtained in the form of second-order regression equations of the content of impurities in the seed mixture of the tray and the content of seeds of the main small-seeded crop (mustard, rye, rapeseed) in the seed mixture of the cylinder on its diameter, frequency of its rotation, duration of its rotation

counterclockwise and clockwise , the total duration of rotation, the number of seeds and impurities in the seed mixture, which makes it possible to justify the rational design and technological parameters of the selection and seed trier;

The method and algorithm of operation of the mechatronic control system of the selection-seed trier have been developed, which is based on the recognition of the trajectory of the seed flight from the video image and the automatic installation of the tray in the position determined by dependencies.

The analytical dependence of the angle of deviation of the center of mass of the component of the seed mixture on the angle of rotation and the diameter of the cylinder with cells of the selection-seed trier was further developed, which makes it possible to justify the rational design and mode parameters of its operation;

Analytical and experimental dependences of changes in the minimum and maximum angles of exit of seeds of small-seeded crops (mustard, rye, rapeseed) from the cells of the cylinder of the selection and seed trier on its diameter, rotation frequency, number of seeds and impurities in the seed mixture were further developed, which makes it possible to substantiate rational constructive - technological parameters of its work.

The complex of precision technical and technological support of the processes of separation of seed material of small-seeded crops has been improved by introducing a selection and seed trier as part of the mechatronic control system.

The presented analysis of the precision technical and technological support of the process of separation of seed material of small-seeded crops by geometric dimensions makes it possible to assert the need to improve trier separators based on automated control of their parameters using photo or video recording of the process of separation of seed material with further processing. The design and technological scheme of the selection and seed trier as part of the mechatronic system has been developed. The difference between the proposed design and the traditional one is that the camera captures the flight path of the seeds and processes this information, which subsequently allows changing the rotation frequency of the motor-reducer and, as a result, the cylinder with shells, the angle of inclination of the tray, the angle of rotation of the shutter with the stepping motor of the hopper-doser. Controlling the mode parameters of the selection and seed trier allows you

to adjust it to changes in the composition of the seed mixture, which increases the quality of separation and reduces the loss of liquid seeds.

As a result of analytical studies of the process of interaction of the components of the seed mixture of small-seeded crops with the working body of the selection and seed trier, the dependence of the angle of deviation of the center of mass of the component of the seed mixture on the angle of rotation of the cylinder was obtained. The obtained dependence makes it possible to determine the minimum angle of rotation of the cylinder with shells at which the component of the seed mixture begins to rotate relative to the center of mass.

A model of the process of separation of seed material of small-seeded crops on a selection-seed trier was developed in the Simcenter Star-CCM+ software package. As a result of numerical modeling of the process of separation of seed material of small-seeded crops on a selection-seed trier, dependencies were obtained in the form of second-order regression equations of the values of the minimum and maximum angles of seed exit from the cylinder envelope on the research factors (cylinder diameter, cylinder rotation frequency, number of seeds and impurities in the seed chamber mixtures). According to the simulation results, dependencies in the form of second-order regression equations of the number of all components and the relative content of impurities ε in the seed mixture were obtained, which were within the limits of the minimum and maximum rotation angles of the trier cylinder from the research factors. Solving the compromise problem in the Wolfram Cloud software package, which boils down to minimizing the relative content of impurities ε and maximizing the number of all components of the seed mixture that were within the minimum and maximum rotation angles of the cylinder, rational design and technological parameters of the selection-seed trier separator were obtained.

As a result of numerical modeling of the process of separation of seed material of small-seeded crops on a selection-seed trier at a variable rotation frequency, the dynamics of changes in the number of seeds and impurities N_I and the relative content of impurities in the seed mixture of the tray were obtained. As a result of numerical modeling of the process of separation of seed material of small-seeded crops on a selection-seed trier at a variable rotation frequency, the dependences of the number of seeds and impurities, the

relative content of impurities in the seed mixture of the tray and the conditional productivity of the trier on the duration of rotation of the cylinder counterclockwise and clockwise were obtained. By solving the compromise problem in the Wolfram Cloud software package, we obtain the rational mode parameters of the trier separator.

As a result of experimental studies of the selection and seed trier as part of the mechatronic system and the processing of the obtained data, the dependences in the form of second-order regression equations of the mass of the seed mixture in the tray, the relative content of impurities in the seed mixture of the tray, the relative content of the seeds of the main crop in the seed mixture of the cylinder on frequency were determined rotation of the cylinder n , duration of its rotation counterclockwise and clockwise, duration of work. By solving the compromise problem in the Wolfram Cloud software package, the rational mode parameters of the trier separator were obtained.

A comparison of the obtained experimental data with the theoretical ones showed that the obtained data practically coincided. This is confirmed by statistical analysis with the obtained values of correlation coefficients between theoretical and experimental dependences.

Based on the results of theoretical and experimental research, the method and algorithm of the mechatronic control system of the selection-seed trier was developed, which is based on the improved software package TracTrac, which allows you to recognize the trajectory of the seed's flight from the video image. A comparison of the basic and improved (as part of the mechatronic system) designs of the selection and seed trier showed that the improved trier has a higher power of 0.83 kW and a lower productivity of 123.5 kg/h. The decrease in productivity is explained by a change in the direction of rotation of the cylinder, but at the same time, the efficiency of the technological process of separation of seed material increases, since the content of impurities in the seed mixture of the tray decreases by $0.82 \pm 0.17\%$ and the content of seeds of the main crop in the seed mixture of the cylinder by $16.85 \pm 2, 69\%$.

As a result of the economic evaluation, it was established that the proposed improved design of the selection and seed trier as part of the mechatronic system has higher capital investments (up to 40%) and higher costs for its depreciation, repair and

maintenance (27%). The economic effect is achieved due to the reduction of losses of liquid seeds in the process of separation of the seed mixture (35.4%). The specific economic effect of the separation process of the mustard seed mixture weighing 5000 kg is UAH 12.02/kg, and the payback period of additional capital investments is 1.33 years.

The selection and seed trier for the separation of seeds of small-seeded oil crops as part of the mechatronic system has been introduced into the production of the IOC of the National Academy of Sciences. «Ukrnasinniaprom» LLC adopted scientific and methodical recommendations for setting up a trier separator for seed material of small-seeded crops for implementation in production. The results of scientific and technical work in the form of design and technical documentation of the selection and seed trier were implemented and used in the production of LLC «Sorting Machines» for the production of the corresponding experimental sample. «VNIS GENETICS» LLC received recommendations for setting up a selection-seed trier for the separation, separation and cleaning of small-seeded oilseed and grain crops in the form of appropriate mathematical dependencies and structural and technological schemes.

Keywords: seed, grain, grain mixture, impurities, heap, loose material, particles, separation, cleaning, separation, separation, sorting, process, technological complex, trier, separator, numerical modeling, parameters, installation, quality assessment, discrete element method, automation, mechatronic system, mathematical model, simulation, fluidized bed, concentration, regression, efficiency, management, calculation, optimization, trajectory.

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА, В ЯКИХ ОПУБЛІКОВАНІ ОСНОВНІ НАУКОВІ РЕЗУЛЬТАТИ ДИСЕРТАЦІЇ

Статті у періодичних наукових виданнях, проіндексованих у базах даних Web of Science Core Collection та/або Scopus:

1. Aliiev E., **Lupko K.** (2021). Prerequisites for the Creation of a Mechatronic System of Indented Cylinders for the Separation of Fine Seeds. Scientific Horizons. 24(3): 75–86. DOI: 10.48077/scihor.24(3).2021.75-86 *(Здобувачу належить аналіз мехатронних систем трієрів для сепарації насіння).*

2. Aliiev E., **Lupko K.**, Kobets O. (2023). Development of adaptive seed-separation trier for small-seeded crops. Bulletin of the Transilvania University of Brasov. Series II: Forestry. Wood Industry. Agricultural Food Engineering. 6 (65), 1: 103–126. DOI: 10.31926/but.fwiafe.2023.16.65.1.8 *(Здобувачу належить чисельного моделювання і розробка системи керування трієром).*

Статті у наукових виданнях, включених до переліку наукових фахових видань України:

3. Алієв Е.Б., **Лупко К. О.** (2020). Морфологічні ознаки і фізико-механічні властивості насіння дрібнонасінних культур. Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин. 50: 27–35. DOI: 10.32515/2414-3820.2020.50.27-35 *(Здобувачу належить проведення лабораторних досліджень із визначення фізико-механічних властивостей насіння).*

4. Aliiev E., **Lupko K.** (2022). Results of numerical modelling of the process of separation of seed material of small-seeded crops on a cylindrical cell trier. Machinery & Energetics. 13(2): 9–19. DOI: 10.31548/machenergy2022.01.009 *(Здобувачу належить проведення чисельного моделювання процесу сепарації).*

5. Алієв Е.Б., **Лупко К. О.** (2023). Методика симуляції процесу сепарації насіннєвого матеріалу дрібнонасіннєвих культур на циліндричному чарунковому трієрі. Вібрації в техніці та технологіях. 1 (108): 36–44. DOI: <https://doi.org/>

10.37128/2306-8744-2023-1-4 *(Здобувачу належить проведення чисельного моделювання процесу сепарації).*

6. Алієв Е.Б., Лупко К. О. (2023). Результати експериментальних досліджень селекційно-насінницького трієра. Центральнотуркранський науковий вісник. Технічні науки. ЦНТУ. 7 (38), II: 67–74. DOI: 10.32515/2664-262X.2023.7(38).2.67-74 *(Здобувачу належить проведення експериментальних досліджень).*

Розділи монографії:

7. Алієв Е. Б., Миколенко С. Ю., Сова Н. А., Алієва О. Ю., Малегін Р. Д., Лупко К. О., Лінко М. О., Гезь Я. В., Безугла Л. С. (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. ISBN 978-966-981-687-0 *(Здобувачу належать розділи «3.1 Чарунковий циліндричний трієр для підготовки зернових компоненті», «4.3 Методика лабораторних досліджень з визначення фізико-механічних властивостей зернової сировини»).*

Патент України:

8. Алієв Е. Б., Лупко К. О. (2023). Патент України на корисну модель №152573. МПК В07В 1/08 (2006.01). Адаптивний селекційно-насінницький трієр. Заявник: Інститут олійних культур національної академії аграрних наук України, № u202201745. Заявл. 26.05.2022. Опубл. 15.03.2023, бюл. № 11 *(Здобувачу належать ідея додати фотокамерою, об'єктив якої направлений всередину барабана із чарунками і яка встановлена на передній частині лотка).*

Статті у інших наукових виданнях:

9. Алієв Е.Б., Лупко К.О., Белка О.В., Алієва О.Ю. (2021). Трієрний сепаратор насінневого матеріалу дрібнонасінневих олійних культур. Науково-технічний бюлетень Інституту олійних культур НААН. 31: 118–132. DOI: 10.36710/іос-2021-31-11 *(Здобувачу належать розробка конструктивно-технологічної схеми мехатронної системи трієрного сепаратора).*

10. Алієв Е. Б., **Лупко К. О.**, Долгіх Д. О. (2022). Фізико-математична модель взаємодії компонентів насінневої суміші дрібнонасінневих олійних культур із робочим органом трієра. Науково-технічний бюлетень Інституту олійних культур НААН. 32: 123–131. DOI: 10.36710/ІОС-2022-32-12 *(Здобувачу належать теоретичні дослідження процесу переміщення компонента насінневої суміші в чарунці селекційно-насінницького трієра).*

Тези і матеріали конференцій:

11. Алієв Е. Б., **Лупко К. О.** (2020). Застосування трієрних сепараторів для очищення насіння дрібнонасінневих культур. Матеріали ХХІ Міжнародної наукової конференції «Сучасні проблеми землеробської механіки» (17–18 жовтня 2020 р.). Харків: ХНТУСГ. 116. *(Здобувачу належить аналіз сепараторів для очищення насіння дрібнонасінневих культур).*

12. **Лупко К. О.** (2021). Сепарація насінневого матеріалу олійних культур на трієрах. Олійні культури: сьогодення та перспективи. Збірник тез Міжнародної наукової інтернет-конференції (31 березня 2021 р.). Запоріжжя. ІОК НААН. 108–109.

13. Алієв Е. Б., **Лупко К. О.** (2022). Результати симуляції процесу сепарації насінневого матеріалу дрібнонасінневих культур на циліндричному чарунковому трієрі при змінній частоті обертання. Матеріали науково-практичної інтернет-конференції «Сучасні напрями та досягнення селекції і насінництва сільськогосподарських культур» (26 квітня 2022 р.). Полтавський державний аграрний університет. 135–137. *(Здобувачу належить проведення симуляції процесу сепарації насінневого матеріалу дрібнонасінневих культур на селекційно-насінницькому трієрі).*

14. **Лупко К. О.** (2023). Методика проведення експериментальних досліджень процесу сепарації дрібнонасінневих культур на лабораторному циліндричному чарунковому трієрі. Збірник тез Міжнародної наукової інтернет-конференції «Олійні культури: сьогодення та перспективи» (21 березня 2023 р.). Запоріжжя. ІОК НААН. 129–130.

15. **Лупко К. О.** (2023). Алгоритм роботи системи розпізнавання траєкторій польоту насіння по відеозображенню. Збірник матеріалів Міжнародної науково–практичної конференції «Зелене повоєнне відновлення продовольчих систем в Україні» (26 січня 2023 р.). Одеса. ІКОСГ НААН. 286–289.

Депоновані звіти:

16. Техніко-технологічне забезпечення комплексної безвідходної переробки рослинної сировини у біологічно цінні харчові продукти і кормові добавки: звіт про НДР (остаточний). МОН, ДДАЕУ; кер. Миколенко С.; вик.: Сова Н., Алієв Е., Безугла Л., Долгих Д., Алієва О., Піддубцева О., Плотка Л., Гезь Я., Тимчак Д., Худайбердієва К., **Лупко К.**, Лінко М., Малегін Р. Дніпро, 2022. 452 с. № ДР 0120U100322 (*Здобувачу належать розділи 1.1, 1.2, 2.1, 2.2, 3.1 і висновки*).

17. Техніко-технологічне оснащення первинного насінництва олійних культур: звіт про НДР (проміжний). Етап 2022 р.: Розробити адаптивну мехатронну систему цільового поділу та відбору насінневого матеріалу олійних культур за спадковими ознаками. НААН, ІОК НААН; кер. Алієв Е.; вик.: Поляков О., Пацула О., Белка О., Усова Н., Нікітенко Н., Цапик Т., Школова С., **Лупко К.**, Доценко Є. Запоріжжя, 2022. 102 с. № ДР 0120U105450 (*Здобувачу належать розділи 3.1, 4.3*).

ЗМІСТ

ВСТУП.....	18
1 СУЧАСНИЙ СТАН ПРОБЛЕМИ І ВИБІР НАПРЯМІВ ДОСЛІДЖЕНЬ....	24
1.1 Технологічні вимоги до процесу сепарації насіннєвого матеріалу дрібнонасіннєвих культур	24
1.2 Огляд досліджень з визначення фізико-механічних властивостей насіннєвого матеріалу дрібнонасіннєвих культур	25
1.3 Аналіз трієрних сепараторів насіннєвого матеріалу олійних культур...	29
1.3.1 Основи сортування насіння	29
1.3.2 Побудова мехатронної системи розділення насіння за геометричними розмірами.....	31
1.3.3 Принцип роботи чарункового циліндричного трієра	40
1.3.4 Аналіз конструкцій чарункових циліндричних трієрів.....	45
1.3.5 Попередні дослідження процесу сепарації насіння на чарунковому циліндричному трієрі.....	49
1.4 Обґрунтування конструктивно-технологічної схеми мехатронної системи трієрного сепаратора.....	51
1.5 Висновки з розділу	53
1.6 Мета і задачі досліджень.....	54
2 ТЕОРЕТИЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ селекційно-насінницького трієра	56
2.1 Дослідження процесу взаємодії компонентів насіннєвої суміші із робочим органом селекційно-насінницького трієра.....	56
2.2 Методика чисельного моделювання процесу сепарації насіннєвого матеріалу дрібнонасіннєвих культур на селекційно-насінницькому трієрі	64
2.3 Результати чисельного моделювання процесу сепарації насіннєвого матеріалу дрібнонасіннєвих культур на селекційно-насінницькому трієрі	70
2.4 Результати чисельного моделювання процесу сепарації насіннєвого матеріалу дрібнонасіннєвих культур на селекційно-насінницькому трієр при змінній частоті обертання	88
2.5 Висновки з розділу	98

3	ПРОГРАМА І МЕТОДИКА ПРОВЕДЕННЯ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ	101
3.1	Мета, задачі і програма експериментальних досліджень	101
3.2	Методика лабораторних досліджень з визначення фізико-механічних властивостей дрібнонасіньових культур	102
3.3	Методика експериментальних досліджень процесу сепарації дрібнонасіньових культур на селекційно-насіньовому трієрі	108
3.4	Алгоритм роботи системи розпізнавання траєкторій польоту насіння по відеозображенню	115
3.5	Методика експериментальних досліджень селекційно-насіньового трієра у складі мехатронної системи	124
4	РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ.....	127
4.1	Результати лабораторних досліджень з визначення фізико-механічних властивостей дрібнонасіньових культур	127
4.2	Результати експериментальних досліджень процесу сепарації дрібнонасіньових культур на селекційно-насіньовому трієрі	129
4.3	Результати експериментальних досліджень селекційно-насіньового трієра у складі мехатронної системи.....	135
4.4	Порівняння теоретичних і експериментальних досліджень	143
4.5	Висновки з розділу	146
5	РЕАЛІЗАЦІЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕНЬ	148
5.1	Випробування селекційно-насіньового трієра	148
5.2	Впровадження результатів досліджень	151
5.3	Техніко-економічна ефективність застосування розробленого селекційно-насіньового трієра.....	152
5.4	Висновки з розділу	154
	ВИСНОВКИ.....	156
	СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	160
	ДОДАТКИ.....	178

ВСТУП

Актуальність теми. Важливою задачею агропромислового виробництва залишається збільшення асортименту насіннєвого матеріалу [1] для задоволення зростаючих потреб фермерських господарств різної форми власності. При досягнутому рівні виробництва насіннєвого матеріалу зростає навантаження на насіннеочисну техніку, що призводить до порушення технології його потокової післязбиральної обробки [2].

Якість насіннєвого матеріалу після обробки в значній мірі визначається відповідністю технічних засобів об'єму та раціональної технології післязбиральної обробки насіння [3]. Тому обробка насіння в існуючих технологічних лініях не дозволяє здійснювати відбір високоякісного насіння без витрат та забезпечити ефективність їх очистки від домішок за довжиною.

В закладах України, що займаються селекційно-насінницькою роботою для очищення насіння різних сільськогосподарських культур, зібраних з дослідницьких ділянок, застосовуються в якості базових машин трієри, виготовлені більше 20 років тому. Фізично машини зношені, а конструкції потребують модернізації.

У відповідності до чинного державного стандарту України ДСТУ 2240-93 [4], характеристики насіння дрібнонасінневих культур щодо їх сортових та посівних якостей визначаються зокрема за їх сортовою чистотою, яка повинна бути в межах 99,6-99,9% для елітного насіння (еліта, супереліта), залежно від конкретної культури. Відповідно до Державної цільової програми розвитку аграрного сектору, необхідне «...стимулювання збільшення виробництва насіння сільськогосподарських культур вітчизняної селекції у базовій та добазовій категоріях...» [5].

Аналіз результатів, отриманих науковцями і фахівцями Bühler Schmidt-Seeger, Denis Prive, NEUERO Farm- und Fördertechnik GmbH, PETKUS Technologie GmbH (Німеччина), Zanin F.lli s.r.l. (Іспанія), Westrup (Данія), Акурек (Туреччина), показав існування великого різноманіття технологій і технічних засобів післязбиральної переробки насіння і підготовки насіннєвого матеріалу дрібнонасінневих культур. Однак, навіть запропонований комплексний підхід, що включає використання

універсальних очисних машин, не дає змогу систематизувати і розробити науково-технологічні основи процесів очищення та розділення насіння ряду сортозразків дрібнонасінневих культур, таких як льон, гірчиця, ріпак, рижій, шавлій, амарант та ін. [6]. Одним із варіантів вирішення цієї задачі є удосконалення існуючих технічних засобів для сепарації шляхом створення мехатронних систем автоматизованого керування їх конструктивно-режимними параметрами.

Тому в рамках досліджень передбачено розробка мехатронної системи сепарації насінневого матеріалу дрібнонасінневих культур і обґрунтування її конструктивно-технологічних параметрів, застосування якої дозволить виконувати технологічний процес сепарації з меншими втратами ліквідного насінневого матеріалу (на 7-10 %) і більш високою якістю (до 5 %).

Зв'язок роботи з науковими програмами. Дослідження, що складають основу дисертації, проведено в Дніпровському державному аграрному університеті (ДДАЕУ) згідно з планом науково-дослідної роботи: «Техніко-технологічне забезпечення комплексної безвідходної переробки рослинної сировини у біологічно цінні харчові продукти і кормові добавки» (№ ДР 0120U100322, 2020–2022 рр.) та Інституті олійних культур Національної академії аграрних наук України (ІОК НААН) згідно з планом науково-дослідної роботи: «Техніко-технологічне оснащення первинного насінництва олійних культур» (№ ДР 0120U105450, 2022 р.) і договором про наукове співробітництво № 1 від 24.01.2022 р. між ДДАЕУ і ІОК НААН.

Мета дослідження: підвищення ефективності процесу сепарації насінневого матеріалу дрібнонасінневих культур шляхом розробки конструкції селекційно-насінницького трієра у складі мехатронної системи із обґрунтованими конструктивно-технологічними параметрами, що забезпечують задану прецизійність.

Для досягнення поставленої мети було висунуто **наукову гіпотезу**, згідно з якою прецизійність сепарації насінневого матеріалу дрібнонасінневих культур за геометричними розмірами на селекційно-насінницькому трієрі можна досягти за

рахунок використання мехатронної системи на базі відповідних виконавчих органів і системи фотоспостереження за процесом.

Задачі дослідження:

– провести аналіз техніко-технологічного забезпечення процесу сепарації насінневого матеріалу дрібнонасіневих культур за геометричними розміром і обґрунтувати конструктивно-технологічну схему відповідного селекційно-насіницького трієра у складі мехатронної системи;

– провести аналітичні дослідження процесу взаємодії компонентів насінневої суміші дрібнонасіневих культур із робочим органом селекційно-насіницького трієра;

– провести чисельне моделювання процесу сепарації насінневого матеріалу дрібнонасіневих культур на селекційно-насіницькому трієрі і встановити відповідні закономірності впливу його конструктивно-режимних параметрів на якість процесу сепарації;

– розробити методикау і провести експериментальних досліджень процесу сепарації дрібнонасіневих культур на селекційно-насіницькому трієрі у складі мехатронної системи та встановити відповідні закономірності процесу її роботи;

– провести випробування і визначити економічну ефективність розробленого селекційно-насіницького трієра у складі мехатронної системи та впровадити результати досліджень у виробництво.

Об'єкт дослідження: технологічний процес сепарації насінневого матеріалу дрібнонасіневих культур на селекційно-насіницькому трієрі у складі мехатронної системи.

Предмет дослідження: насінневий матеріал дрібнонасіневих культур та умови і закономірності протікання технологічного процесу його сепарації за геометричними розмірами.

Методи дослідження. Дослідження базувалися на застосуванні чисельного моделювання з використанням основних принципів класичної механіки, газодинаміки, ймовірності, пружності, моделей дискретних елементів, багатофазної взаємодії та лагранжевої багатофазності. Для цього використовувалися методи

диференційного та інтегрального числення. Експериментальні дослідження були проведені з використанням методу математичного планування, натурних спостережень та експертних оцінок, а обробка й аналіз результатів експериментів здійснювалися з використанням теорії ймовірності та кореляційно-регресійного аналізу. Моделювання та обробка результатів досліджень були виконані за допомогою програмних пакетів Simcenter Star-CCM+ та Wolfram Cloud.

Наукова новизна одержаних результатів. Уперше:

– отримано аналітичні і експериментальні залежності у вигляді рівнянь регресії другого порядку вмісту домішок в насіннєвій суміші лотка і вмісту насіння основної дрібнонасіннєвої культури (гірчиця, рижій, ріпак) в насіннєвій суміші циліндра від його діаметра, частоти його обертання, тривалості його обертання проти і за годинниковою стрілкою, загальної тривалості обертання, кількості насінин і домішок в насіннєвій суміші, що уможлиблює обґрунтувати раціональні конструктивно-технологічні параметри роботи селекційно-насінницького трієра;

– розроблено спосіб і алгоритм роботи мехатронної системи керування селекційно-насінницьким трієром, який базується на розпізнаванні траєкторію польоту насіння по відеозображенню і автоматичному встановленні лотка у визначене залежностями положення.

Отримали подальший розвиток:

– аналітичні залежності зміни куту відхилення центра мас компонента насіннєвої суміші від кута повороту і діаметра циліндра із чарунками селекційно-насінницького трієра, що уможлиблює обґрунтувати раціональні конструктивно-режимні параметри його роботи;

– аналітичні і експериментальні залежності зміни мінімального і максимального кутів виходу насіння дрібнонасіннєвих культур (гірчиці, рижію, ріпаку) з чарунок циліндра селекційно-насінницького трієра від його діаметра, частоти обертання, кількості насінин і домішок в насіннєвій суміші, що уможлиблює обґрунтувати раціональні конструктивно-технологічні параметри його роботи.

Удосконалено:

– комплекс прецизійного техніко-технологічного забезпечення процесів

сепарації насінневого матеріалу дрібнонасінневих культур шляхом введення селекційно-насінницького трієра у складі мехатронної системи керування.

Практичне значення одержаних результатів. Селекційно-насінницький трієр для сепарації насіння дрібнонасінневих олійних культур у складі мехатронної системи впроваджено у виробництво ІОК НААН. ТОВ «Укрнасінняпром» прийняло для впровадження у виробництво науково-методичні рекомендації з налагодження трієрного сепаратора насінневого матеріалу дрібнонасінневих культур. Результати науково-технічної роботи у вигляді конструкторської та технічної документації селекційно-насінницького трієра впроваджені і використані на виробництві ТОВ НВО «Сортувальні машини» для виготовлення відповідного дослідного зразка. ТОВ «ВНІС ГЕНЕТИКС» отримало рекомендації з налагодження селекційно-насінницького трієра для сепарації, розділення і очищення насіння дрібнонасінневих олійних і зернових культур у вигляді відповідних математичних залежностей і конструктивно-технологічних схем.

Особистий внесок здобувача. Теоретичні та експериментальні результати досліджень, що виносяться на захист, отримані автором самостійно. Постановка задач, аналіз і трактування результатів виконані спільно з науковим керівником і частково зі співавторами публікацій. У наукових роботах, які опубліковано у співавторстві, здобувачу належать: [104, 107, 130] – аналіз мехатронних систем трієрів для сепарації насіння; [105, 106, 132, 133] – конструктивно-технологічна схема мехатронної системи трієрного сепаратора; [129] – теоретичні дослідження процесу переміщення компонента насінневої суміші в чарунці селекційно-насінницького трієра; [17, 128] – проведення лабораторних досліджень із визначення фізико-механічних властивостей насіння; [127, 128, 131, 134, 132, 133, 135] – проведення чисельного моделювання процесу сепарації; [128, 132, 133, 166, 167, 168] – проведення експериментальних досліджень;

Апробація результатів дисертації. Основні результати роботи доповідались та отримали позитивну оцінку на: XXI Міжнародній науковій конференції «Сучасні проблеми землеробської механіки» (Україна, Харків, ХНТУСГ, 17–18 жовтня 2020 р.), Міжнародній науковій інтернет-конференції (Україна, Запоріжжя, ІОК

НААН, 31 березня 2021 р.), Науково-практичній інтернет-конференції «Сучасні напрями та досягнення селекції і насінництва сільськогосподарських культур» (Україна, Полтава, ПДАУ, 26 квітня 2022 р.), Міжнародній науково–практичній конференції «Зелене повоєнне відновлення продовольчих систем в Україні» (Україна, Одеса, ІКОСГ НААН, 26 січня 2023 р.), Міжнародній науковій інтернет-конференції «Олійні культури: сьогодення та перспективи» (Україна, Запоріжжя, ІОК НААН, 21 березня 2023 р.), щорічних засіданнях кафедри інжинірингу технічних систем та на вчених радах інженерно-технологічного факультету ДДАЕУ (2021–2023 рр.).

Публікації. Основні результати дисертаційної роботи опубліковані в 17 наукових працях, у тому числі: 1 розділ у колективній монографії; 4 статті у наукових фахових виданнях України (категорії Б); 2 статті у виданнях, що проіндексовані у базі даних Scopus; 1 патент України на корисну модель; 7 матеріалів і тез у збірниках доповідей наукових конференцій, інших наукових виданнях і 2 депонованих звіту.

Структура та обсяг дисертації. Дисертація складається з вступу, 5 розділів, висновків, списку використаних джерел і додатків. Повний обсяг дисертації складає 240 сторінок, у тому числі 17 додатків на 63 сторінках. Обсяг основного тексту дисертації становить 177 сторінки, містить 81 рисунок, 21 таблицю. Список використаних джерел нараховує 174 найменування на 18 сторінках.

1 СУЧАСНИЙ СТАН ПРОБЛЕМИ І ВИБІР НАПРЯМІВ ДОСЛІДЖЕНЬ

1.1 Технологічні вимоги до процесу сепарації насіннєвого матеріалу дрібнонасіннєвих культур

В Україні існує нормативний документ ДСТУ 2240-93 «Насіння сільськогосподарських культур. Сортові та посівні якості» [4], в якому визначено норми для сортових та посівних якостей, методи упаковки, маркування, транспортування і інші відповідні вимоги. Згідно цього стандарту насіннєвий матеріал повинен бути доброякісним: крупним, чистим, з високою схожістю, без збудників хвороб та домішок.

За показниками якості насіннєвий матеріал розділяють на сортовий та посівний. Сортова чистота насіння є найважливішим показником його сортової якості і повинна досягати 99,6–99,9 % для елітного насіння (еліта, супереліта), в залежності від конкретної культури. До посівних якостей насіннєвого матеріалу відносять чистоту, вологість, масу 1000 насінин, енергію проростання, схожість.

Вимоги до насіння дрібнонасіннєвих культур наведені у таблиці 1.1.

Таблиця 1.1 – Норми якості насіння дрібнонасіннєвих культур [4]

Культура	Категорії насіння	Сортова чистота	Вміст насіння			Схожість	Вологість, % максимум
			Основної культури	Інших видів, шт./кг, максимум культурних	бур'янів		
1	2	3	4	5	6	7	8
Гірчиця	ОН	99,6	99	40	40	90	12
	ЕН	99,2	98	40	40	85	12
	РН-1-3	97,2	98	320	400	80	12
Льон олійний	ОН	99,7	99	20	120	90	12
	ЕН	99,7	98	20	140	85	12
	РН-1-3	98,0	97	40	500	80	12
	РН-п	97,0	96	60	1500	8	12
Ріпак озимий	ОН	99,8	99	40	8	90	12
	ЕН	99,6	98	80	120	85	12
	РН-1-3	97,2	96	120	280	80	12
Ріпак ярий	ОН	99,8	98	120	80	90	10
	ЕН	99,6	97	160	120	85	10

1	2	3	4	5	6	7	8
	РН-1-3	97,2	96	240	320	75	10
Рижій	ОН	99,7	98	80	160	90	13
	ЕН	99,3	97	120	200	85	13
	РН-1-3	95,0	92	200	800	80	13
Кмин	ОН	99,8	99	50	150	80	12
	ЕН	99,6	99	50	250	75	12
	РН-1-3	95,0	99	50	250	70	12
Коноплі	ОН	99,8	99	50	50	85	13
	ЕН	99,6	98	50	50	8	13
	РН-1-3	75,0	96	50	150	70	13
Кунжут	ОН	99,8	99	20	120	90	9
	ЕН	99,6	98	40	160	85	9
	РН-1-3	92,0	95	200	400	80	9

Виходячи з даних таблиці 1.1, можна зробити висновок, що до насінневого матеріалу дрібнонасінних культур висуваються дуже високі вимоги, яких можна досягти завдяки детальному дослідженню фізико-механічних властивостей насінневого матеріалу кожної культури та правильним підбором обладнання для сепарації, виходячи з отриманих результатів досліджень.

1.2 Огляд досліджень з визначення фізико-механічних властивостей насінневого матеріалу дрібнонасінневих культур

Визначення закономірностей впливу морфологічних показників на фізико-механічні властивості насіння дрібнонасінневих культур значно спрощує створення бази даних і проведення систематизації зразків насіння (рис. 1.1).

Розробка новітніх технологій та технічних пристроїв для проведення очищення та розділення можлива завдяки розумінню характерних морфологічних показників для кожної із дрібнонасінних культур.

При проведенні післязбиральної обробки насіння необхідно враховувати його фізико-механічні властивості. Цей показник є одним з найважливіших, оскільки майже все насіння піддається механічному впливу – руйнуванню, перемішуванню, транспортуванню тощо. Без знання властивостей оброблювального матеріалу неможливо спроектувати та розрахувати обладнання для проведення технологічних операцій. Для формування моделей та емпіричних математичних залежностей

необхідно знати значення маси 1000 насінин, щільності, коефіцієнту тертя, кута природнього відкосу. Ці показники зможуть дозволити встановити оптимальні і раціональні параметри робочих органів, які застосовуються в технологічних процесах очистки та сепарації насінневого матеріалу.

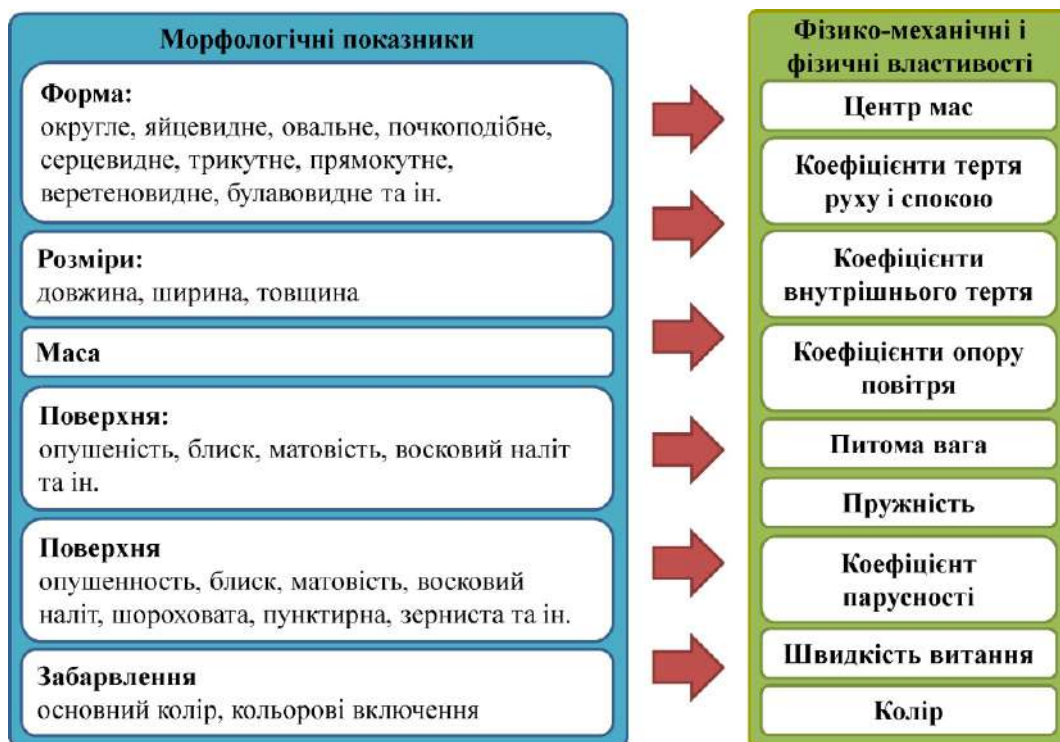


Рисунок 1.1 – Морфологічні та фізико-механічні властивості насіння дрібнонасінних культур [4]

Визначенню властивостей дрібнонасінних культур присвячені роботи багатьох дослідників. Знання про морфологію, розмірні та технологічні властивості є важливими при проектуванні обладнання для сушіння та післязбиральної обробки насінневого матеріалу [7, 8, 9, 10, 11, 12].

Для ідентифікації виду насіння використовуються зовнішні морфологічні ознаки. Деякі з цих ознак (такі як контур, форма, поверхня) не змінюються, в той час як інші (такі як забарвлення, розміри) можуть змінюватися. При визначенні основних характеристик насіння дотримуються наступної послідовності основних морфологічних ознак [6].

Форма насіння (плоду) визначається через його контур, що є найбільш постійною та характерною ознакою. Контур може бути різних варіантів, наприклад, округлий, яйцеподібний, овальний, ниркоподібний, серцеподібний, трикутний, прямокутний, веретеноподібний, булавоподібний і т.д. Для визначення цього параметра використовуються два виміри: довжина і ширина. Залежно від того, з якого боку розглядається насіння, його контур може мати кілька різних форм. Тому опис контуру насіння надається в проекції широкої сторони на площині. У випадках, коли це не можливо, зазначається, що контур описується з боку спинки, черевця або збоку [6].

Форма насіння визначається трьома основними вимірами: довжиною, шириною та товщиною. Довжина, в ботанічному розумінні, вимірюється від основи насіння до його вершини. Ширина визначається як відстань між боковими сторонами, що означає, що вимір ширини виконується перпендикулярно до довжини. У звичайному розумінні, довжина відноситься до найбільшого розміру, ширина – до середнього, а товщина – до найменшого розміру [6]. Форма насіння може бути визначена з точки зору його сферичності та співвідношення сторін, які впливають на характеристику плинності продуктів. Розмір і форма є важливими показниками при проектуванні сепаруючих, збиральних, калібрувальних та подрібнювальних машин.

Зовнішня структура насінневих оболонок дуже різноманітна. Основні структурні ознаки поверхні насіння є стійкими, однак під час зберігання та очищення насіння можуть втрачатися деякі додаткові ознаки, такі як опушення, блиск, матовість, восковий нальот [6].

Насіння відрізняється за кольором та характером забарвлення. Колір насіння може варіювати від білого до чорного, включаючи всі можливі перехідні тони і відтінки. Забарвлення зрілих насінин є типовим і може бути однотонним, розсмуженим, плямистим, крапчастим, мармуровим та іншим. Характер забарвлення може варіювати від слабкого до інтенсивного [6]. Насіння розподіляється за розміром (за довжиною) на наступні групи: дуже дрібне (до 1 мм), дрібне (1-2 мм), середнє (2-4 мм), велике (4-8 мм) та дуже велике (понад 8 мм).

Розмір насіння, навіть в межах одного виду, може варіюватися і не є постійним показником. Середній розмір не дає повної інформації про можливі відхилення в будь-яку сторону. Відношення між довжиною, шириною і товщиною насіння вважається більш постійним фактором. При описі насіння зазначаються його верхня і нижня межі. Однак, це співвідношення також може змінюватися залежно від ступеня розвитку і дозрівання насіння [6].

Описані вище показники використовуються для опису насіння рослини з біологічної точки зору і є сільськогосподарськими ознаками, але для проведення процесів очищення і сепарації насіння необхідно досліджувати їх фізико-механічні властивості, від яких залежить ефективність виконання зазначених процесів.

Вміст вологи є важливим показником для проведення процесу сушіння, оскільки впливає на гравіметричні властивості насіння, а саме на об'ємну щільність. Дійсна щільність і маса 1000 насінин використовуються для проектування обладнання, пов'язаного з аерацією, сушінням, зберіганням, транспортуванням, а також впливають на структурні навантаження [13, 14]. Пористість (розрахована на основі об'ємної щільності та дійсної щільності) насіння визначає опір потоку повітря під час аерації та сушіння, де площа поверхні впливає на опір потоку повітря через шар сипучого матеріалу, а дані про них необхідні при проектуванні процесу сушіння. Властивості тертя, такі як кут природного схилу та коефіцієнт тертя, є важливими для транспортних систем, конструкції зернових бункерів та інших складських конструкцій, на роботу яких впливають стисливість і текучість матеріалів. [14]

Визначенню різних фізичних властивостей насіння дрібнонасінневих культур присвячені роботи багатьох дослідників. Наприклад, для проектування обладнання для обробки насіння льону були проведені дослідження осьових розмірів, середніх діаметрів, форми, маси, щільності, кінцевої швидкості та фрикційних властивостей насіння канадського льону [15]. З метою проектування обладнання для транспортування, обробки і зберігання насіння льону було проведено ще одне дослідження фізичних властивостей льону [16]. Науковцями було визначено довжину, ширину, масу 1000 насінин, насипну та справжню щільність, пористість,

кут природного схилу, статичний коефіцієнт тертя при певних показниках вмісту вологи. Визначенню морфологічних ознак і фізико-механічних властивостей гірчиці, рижію, ріпаку та льону певній селекції присвячена робота [17]. У дослідженнях [18] вивчали вплив вмісту вологи на післязбиральні фізико-механічні властивості насіння коноплі, результати яких показали, що вплив вмісту вологи на силу і енергію розриву був значним. Визначенню фізичних властивостей насіння шавлію присвячені дослідження [19]. У дослідженнях [20] науковці визначали фізичні властивості насіння кунжуту.

Таким чином, від фізико-механічних властивостей залежать проектування та розробка обладнання для переробки, сортування, калібрування та іншого обладнання після збору врожаю насіння дрібнонасінневих культур.

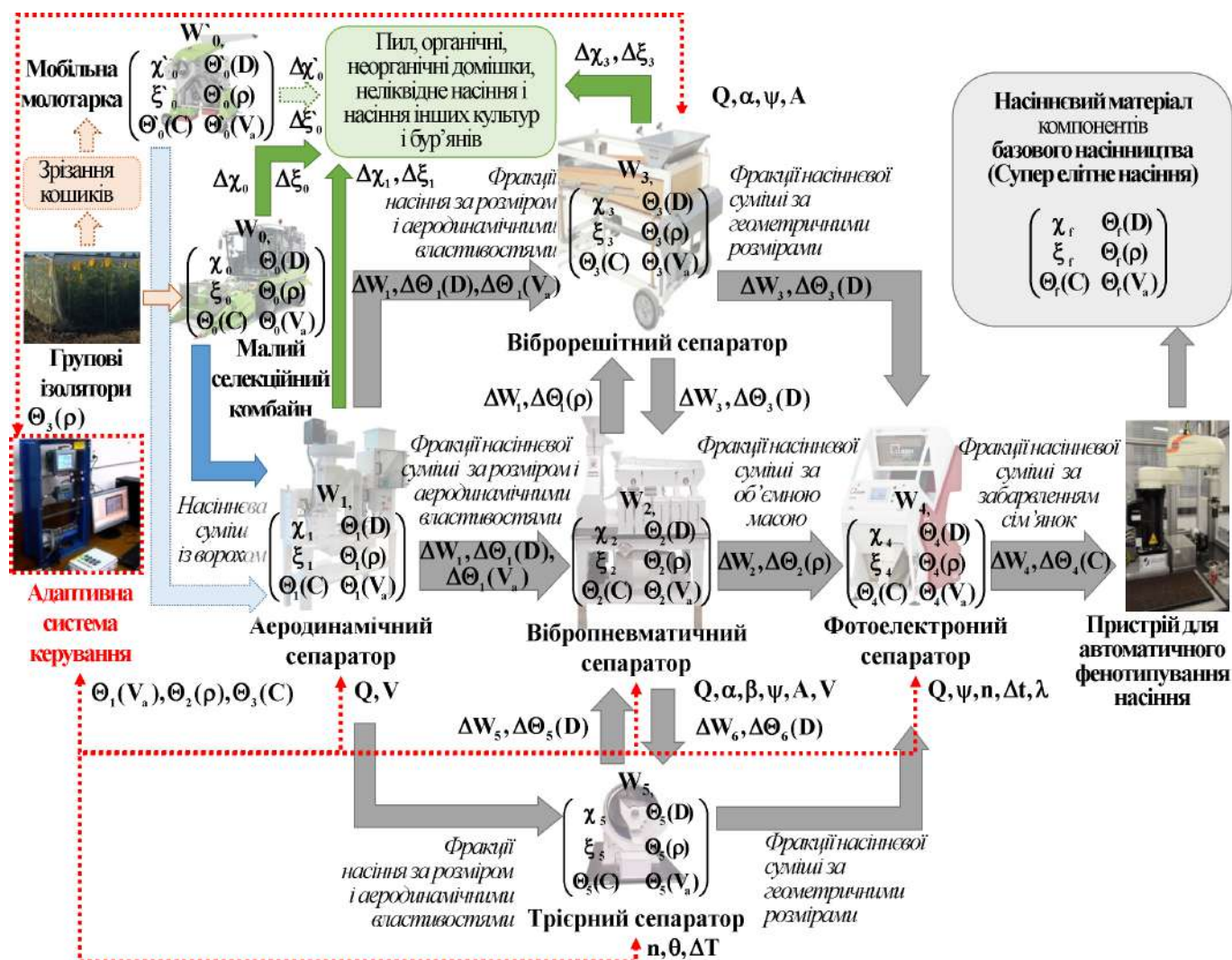
1.3 Аналіз трієрних сепараторів насіннєвого матеріалу олійних культур

1.3.1 Основи сортування насіння

Одним з основних етапів процесу обробки насіннєвого матеріалу є етап сортування насіння, оскільки насіннєва суміш містить у собі різного роду домішки: стебла, листя, мінеральні домішки та ін. Також насіннєвий матеріал буде містити насіння низької якості інших культур, биті та зіпсовані насінини основної культури, а також насіння бур'янів [21, 22, 23]. Завдяки обробці насіннєвого матеріалу шляхом видалення домішок та надлишку вологи підвищується його якість. У принцип роботи насіннеочисного обладнання покладені фізичні відмінності характеристик, які можуть існувати між насінням культурних рослин та іншими небажаними частинками. Сортування насіння можна розглянути як підзадачу сепарації для покращення якості насіннєвого матеріалу.

На результат сортування насіннєвого матеріалу впливають різні індивідуальні фізичні властивості насіння [24]. До фізичних характеристик належать: розмір, довжина, вага, форма, колір тощо [25]. Без проведення огляду фізичних характеристик різних видів насіння неможливе подальше налаштування сучасних

насіннеочисних машин [26, 27], удосконалення і розробка нових видів машин [28, 29]. Оpubліковані огляди характеристик [30, 31, 32, 33] дозволили сформувавши сучасну технологічну лінію процесів сепарації насінневого матеріалу дрібнонасінневих культур з урахуванням їхніх фізико-механічних характеристик (рис. 1.2). Дана галузь досліджень продовжує розвиватися [34, 35, 36].



Q – подача насіння, кг/год; V – швидкість повітря, м/с; α, β – кути нахилу поверхні (решета), °; ψ – частота коливань поверхні (решета), s^{-1} ; A – амплітуда коливань поверхні (решета), м; n – частота обертання барабана, об/хв; Δt – часова затримка спрацьовування форсунки, мс; λ – чутливість фотодатчика, %; θ – кут нахилу лотка, °; ΔT – тривалість обертання барабана, с; W – вологість насінневої суміші, %; χ – вміст органічних і неорганічних домішок, %; ξ – ступінь пошкодження насінневого матеріалу, %; $\Theta(V_a)$ – фракційний склад за аеродинамічними властивостями V_a , %; $\Theta(D)$ – фракційний склад за геометричним розміром D , %; $\Theta(\rho)$ – фракційний склад за об'ємною вагою ρ , %; $\Theta(C)$ – фракційний склад за забарвленням сім'янок C – RGB або C – HSV, %

Рисунок 1.2 – Сучасна технологічна лінія процесів сепарації насінневого матеріалу олійних культур (доопрацьована з [6])

Всі способи сепарації насінневого матеріалу можна розділити за відповідними фізико-механічними властивостями насіння [37, 38, 39]: за аеродинамічними властивостями (у пневматичних колонках та інших повітряних каналах) [40, 41, 42, 43, 44, 45, 46]; за розмірними характеристиками (ширині та товщині на решетах із круглими і прямокутними отворами, довжині – на трієрах) [47, 48, 49]; за щільністю або об’ємною масою (на пневматичних столах, пневмовібросепараторах) [50, 51, 52, 53, 54]; за властивостями поверхні та формі (на гірках, фрикційних сепараторах) [55, 56]; за пружністю (на відбивних сортувальних столах) [57]; за електрофізичними властивостями (у діелектричних сепараторах, сепараторах у полі коронного розряду); за кольором (фотосепаратори) [58, 59, 60, 2].

1.3.2 Побудова мехатронної системи розділення насіння за геометричними розмірами

Існують деякі попередні дослідження в області механічного відділення насіння та його оптимізації. Наприклад, [61] досліджували удосконалення віялки та очисної машини для рису з метою зменшення кількості домішок та втрати ліквідного насіння. Було розроблено прототип віялки та регресійні моделі, завдяки яким дослідники зробили висновки щодо вибору основних параметрів, таких як швидкість повітря, вологість та швидкість подачі. Іншими дослідниками було [62] розроблено математичну модель ефективності очистки в стаціонарній молотарці. Модель застосовує принципи розмірного аналізу в якості теоретичної бази. Також використано розмірний аналіз [63] для математичного моделювання процесу очистки на плоских решетах.

В дослідженнях [64], щодо керування пневмосепараторами для отримання найбільш оптимального результату, був застосований гібридний інтелектуальний підхід, що включав використання штучної нейронної мережі та генетичних алгоритмів. Дослідниками була розроблена блок-схема гібридної інтелектуальної системи оптимального керування, яка показана на рисунку 1.3.

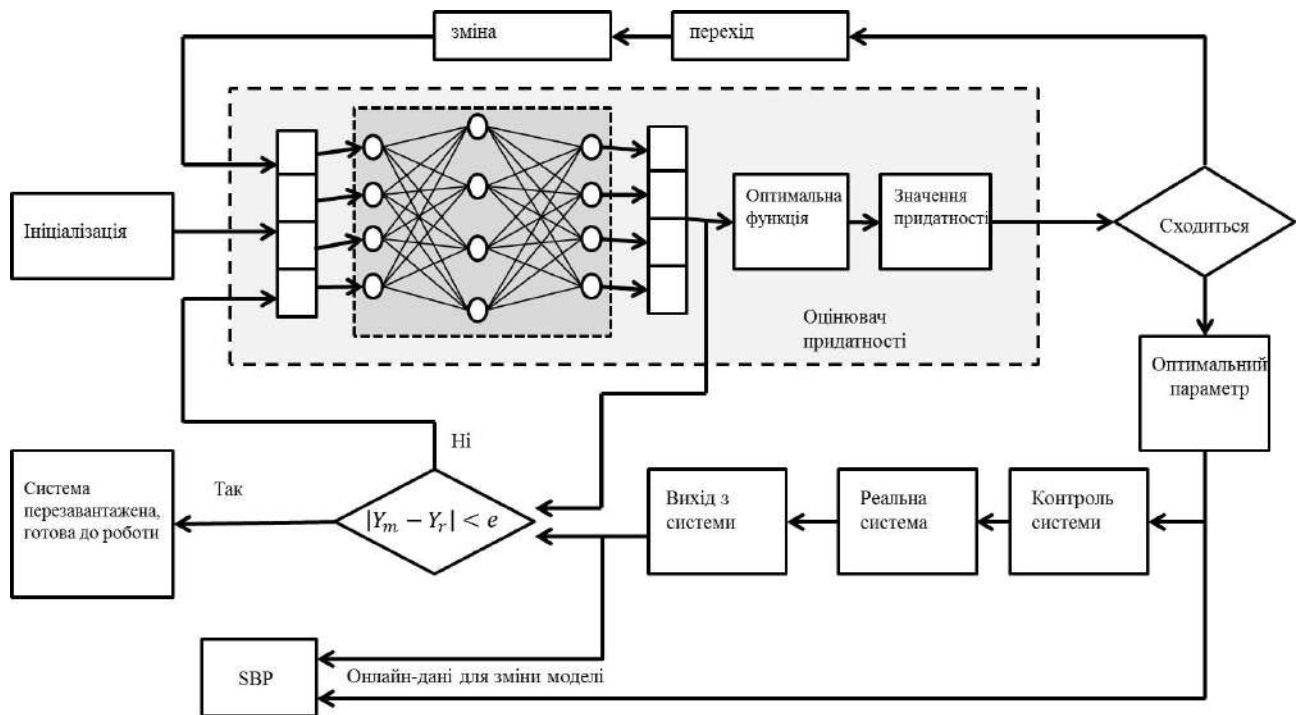


Рисунок 1.3 – Блок-схема гібридної інтелектуальної системи оптимального керування [64]

Пневматичний сепаратор був розроблений [65] та проаналізований використанням подрібнених сумішей трьох сортів люпину. Дослідники визначили кореляції між параметрами процесу розділення та ефективністю процесу розділення. Процес розділення було досліджено з використанням лабораторного обладнання, яке показано на рисунку 1.4.

Автоматизоване моделювання та контролювання аспектів після збору врожаю також інтенсивно досліджувались для систем сушіння насіння та сортування [66]. Останнім часом проявляється інтерес до застосування методів штучного інтелекту для контролю таких процесів.

Циліндр з чарунками використовується для сортування або покращення якості насіння з використанням довжини, як головної відмінної ознаки. Чарунковий циліндр розділяє насінневу масу, що направляється, на 2 фракції: «довгі» насінини та «короткі» насінини.



а



б

а – просіювач пневматичний типу СЗ-1; б – лабораторний вібраційний просіювач RETSCH AS200

Рисунок 1.4 – Лабораторне обладнання для визначення фізичних якостей та проведення процесу розділення і очищення [65]

Також існують інші машини для сортування насіння. Наступна машина, що використовується після циліндричного сепаратора – гравітаційний сепаратор. Цей агрегат розділяє насіння на основі його ваги.

Необхідно, щоб насінини були відносно однорідні за фізичними характеристиками або довжиною – будь-які, які може захопити циліндр з чарунками. Дослідники [67] моделювали гранульований потік на стіл гравітаційного сепаратора (рис. 1.5).

Рух частинок моделювався, як стохастичний процес [68].

В подальшому аналізі будуть використовуватися технології цифрового зображення та методи комп'ютерного сканування (або аналізу зображення) в якості механізму емпіричної вибірки деяких відповідних вихідних змінних чарункового циліндра.

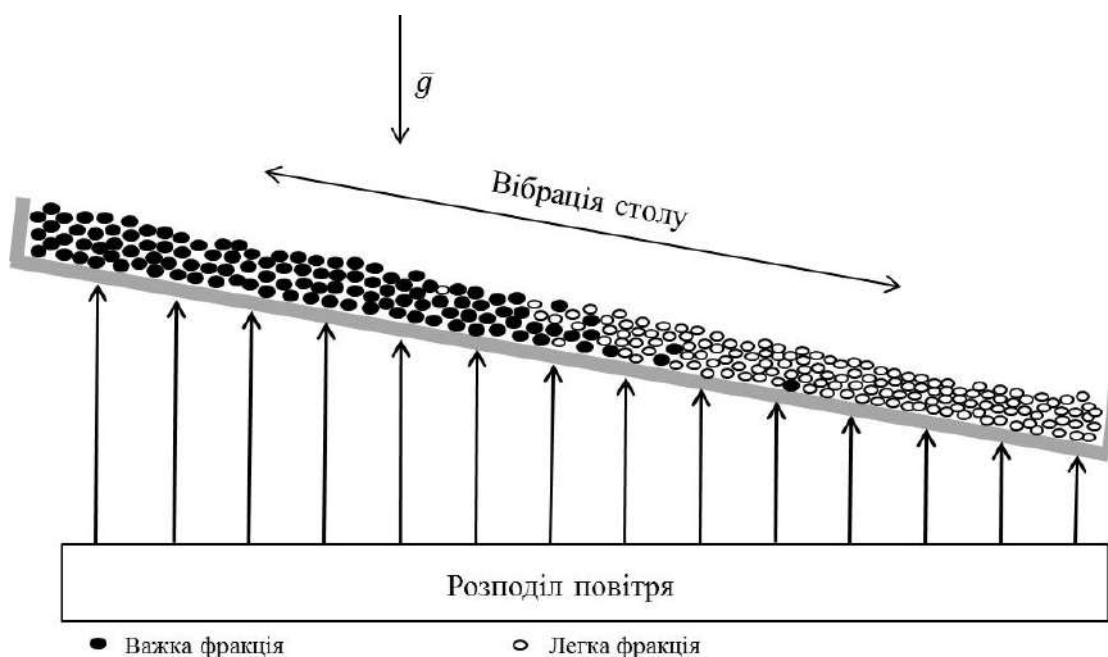


Рисунок 1.5 – Вид гравітаційного столу та поперечного перерізу шару частинок [67]

Робота в суміжних областях, таких як штучний інтелект та розпізнавання об'єктів, ведеться як мінімум 60 років, починаючи з моменту винаходу перших цифрових комп'ютерів. З того часу дані області розвинулись та в цих напрямках проводиться велика кількість досліджень. З часом вони дали початок галузі комп'ютерного сканування – область досліджень, що направлена на розробку методів вилучення візуальної інформації, закодованої пікселями цифрового зображення. Метою є отримання цифрової або символічної інформації, що необхідна для прийняття рішень [69, 70]. Як основна, так і прикладна дисципліна комп'ютерних наукових досліджень, ця галузь значною мірою покладається на методи геометрії, статистики, фізики, теорії навчання тощо для отримання візуальної інформації з даних, що зберігаються в пікселях [71, 72].

Автоматизація та оптимізація перевірки та класифікації насіння за допомогою комп'ютерного сканування/аналізу зображень залишаються важливими, особливо для неінвазивного тестування схожості насіння [73]. Нещодавно лінійка обладнання

для сортування насіння доповнилась застосуванням простої форми аналізу зображення – розділення за кольором.

Така машина класифікує певні види насіння в залежності від їхнього кольору за допомогою різноманітних датчиків. Машини для сортування насіння використовуються в кінці процесу механічної обробки [74, 75].

Класифікація насіння, що не рухається, зазвичай розглядається як проста задача розпізнавання об'єктів. Дослідники [76] зверталися до проблеми класифікації насінневих культур, зосередивши увагу на різноманітних ознаках та класифікаторах. Штучна нейронна мережа була однією із застосованих класифікаторів.

Дискримінантний аналіз використовувався в контрольній класифікації. Досить популярний та в цілому успішний підхід з контрольованого дискримінантного аналізу був використаний [77] для оцінки якості пшениці. В дослідженнях [78] дуже ретельно підійшли до оцінки якості та класифікації насіння ячменю. В роботі використовувалась оцінка розміщення, орієнтації, напрямку та оцінка структури поверхні окремих зерен ячменю.

Згадані до цих пір дослідження об'єднує те, що вони не стосуються фактичного фізичного розділення насіння. Замість цього, дослідження було зосереджене на задачі аналізу зображень для класифікації насіння, яке було статично розміщено перед камерою. Основна увага приділялась розробці нових машин для сортування – зазвичай на основі розділення за кольором в якості орієнтиру.

Розроблено [79] автоматичну систему сортування насіння на основі машинного сканування для автоматизованої класифікації насіння червоної та білої пшениці. Система була здатна обробляти 15 насінин в секунду з точністю понад 92 % (система могла обробляти 15 насінин в секунду з коефіцієнтом класифікації понад 92 %). Блок-схема системи управління, розроблена дослідниками, показана на рисунку 1.6.

Аналогічну систему розроблено [80] для перевірки пшениці та інших зернових культур. Система була здатна обробляти 30 насінин в секунду з точністю від 95 до 99 %. Експеримент проводився з використанням червоного та білого зерна пшениці.

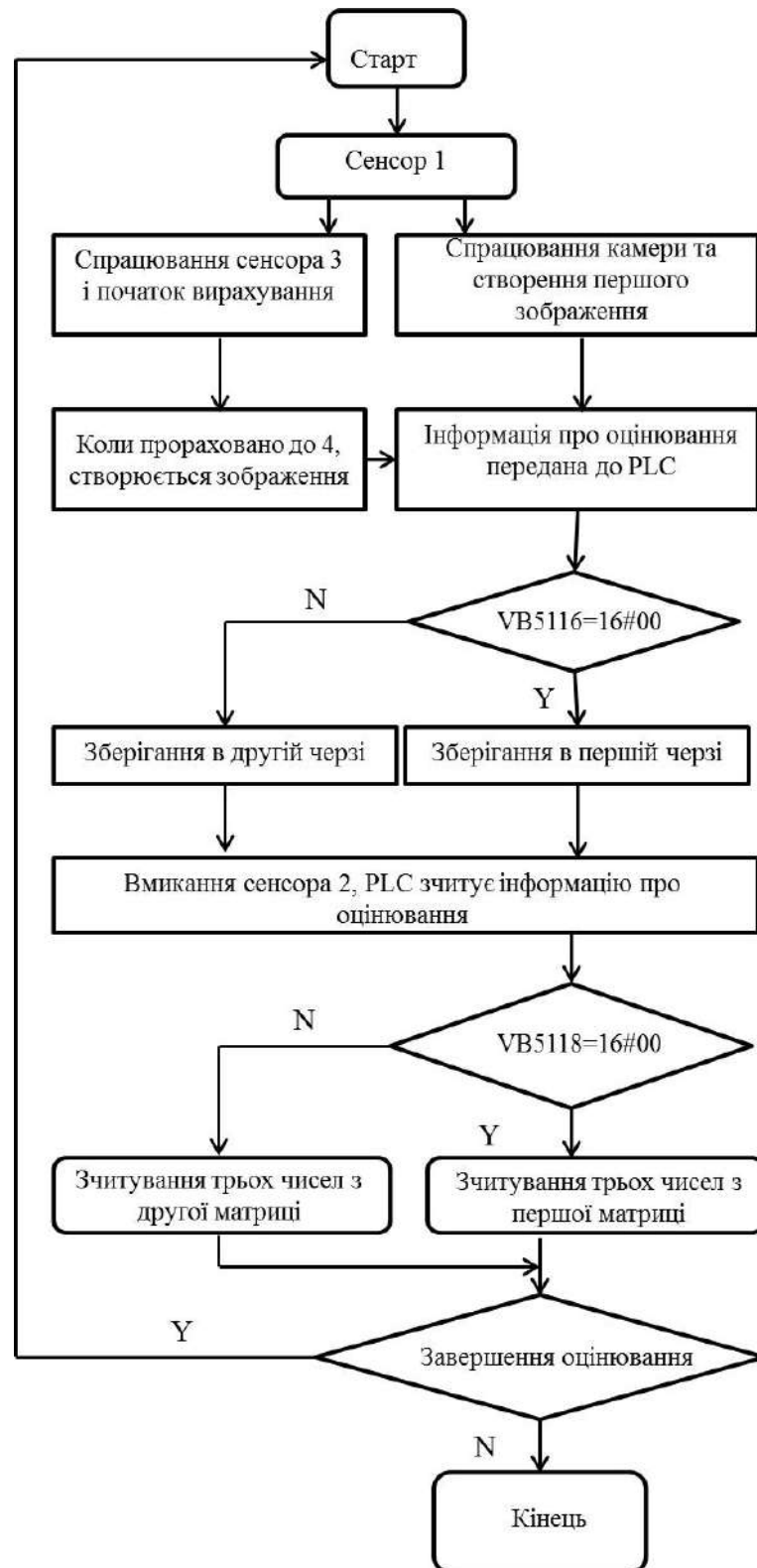
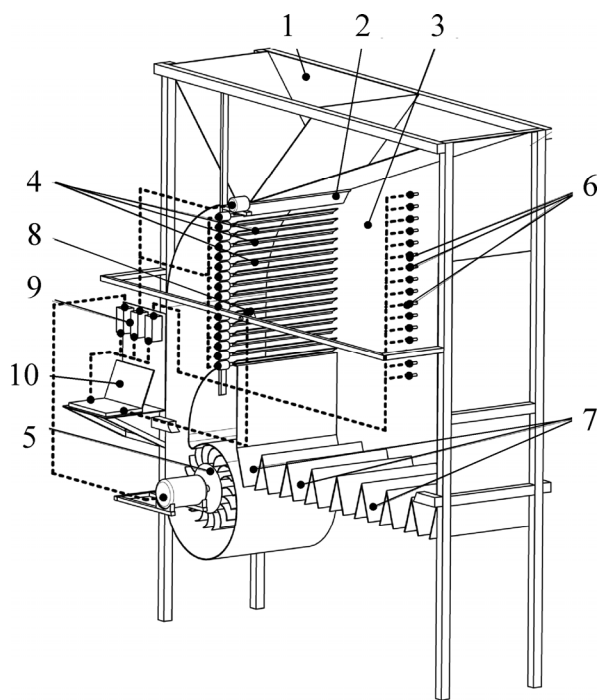


Рисунок 1.6 – Блок-схема системи управління процесом сортування насіння на основі машинного сканування [79]

Розроблено [81] ще один недорогий експрес-пристрій для сортування на основі зображень, що здатний обробляти 75 насінин за секунду. Незначні відхилення кольору та невеликі дефекти поверхні насіння були основним критерієм для класифікації. Цікавою новинкою в сортуванні насіння став запатентований пристрій [82]. Ідея, що стала основою цього винаходу – машина для сортування гранул, в основі якої лежать експлуатаційні характеристики циліндричного трієра.

Алієвим Е.Б. розроблені адаптивний аеродинамічний сепаратор (рис. 1.7), адаптивний віброрешітний сепаратор (рис. 1.8), адаптивний вібропневматичний сепаратор (рис. 1.9), удосконалений фотоелектронний сепаратор (рис. 1.10), пристрій для автоматичного фенотипування насіння (рис. 1.11) [83, 84, 85, 86, 87, 88, 89, 90, 91, 92].



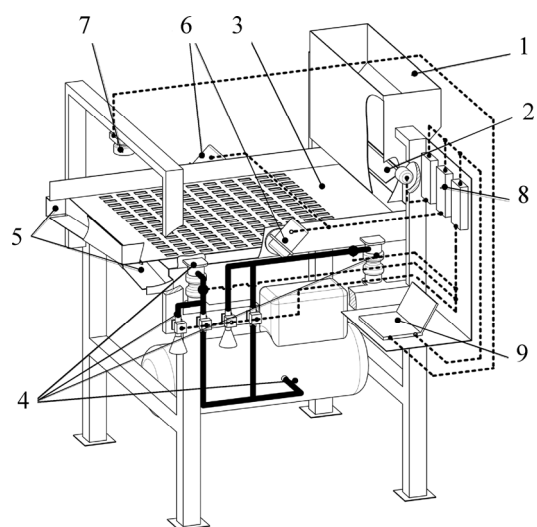
а



б

1 – бункер; 2 – заслінка із кроковим електродвигуном; 3 – сепараційна камера;
4 – каскад заслінок; 5 – відцентровий вентилятор із електроприводом; 6 – датчики швидкості повітряного потоку; 7 – забірники фракцій; 8 – фотокамера; 9 – блоки керування; 10 – персональний комп'ютер

Рисунок 1.7 – Конструктивно-технологічна схема (а) і загальний вигляд (б) експериментального зразка адаптивного аеродинамічного сепаратора [6]



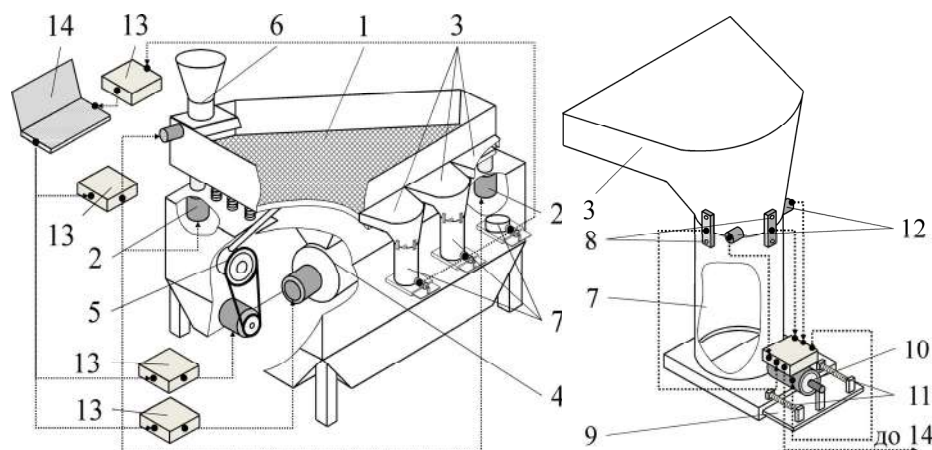
а



б

1 – бункер; 2 – заслінка із кроковим електродвигуном; 3 – решето; 4 – система регулювання кута нахилу решета; 5 – вивантажувальні вікна для сходу і проходу; 6 – електровібратори; 7 – фотокамера; 8 – блоки керування; 9 – персональний комп'ютер

Рисунок 1.8 – Конструктивно-технологічна схема (а) і загальний вигляд (б) експериментального зразка адаптивного віброрешітного сепаратора [6]



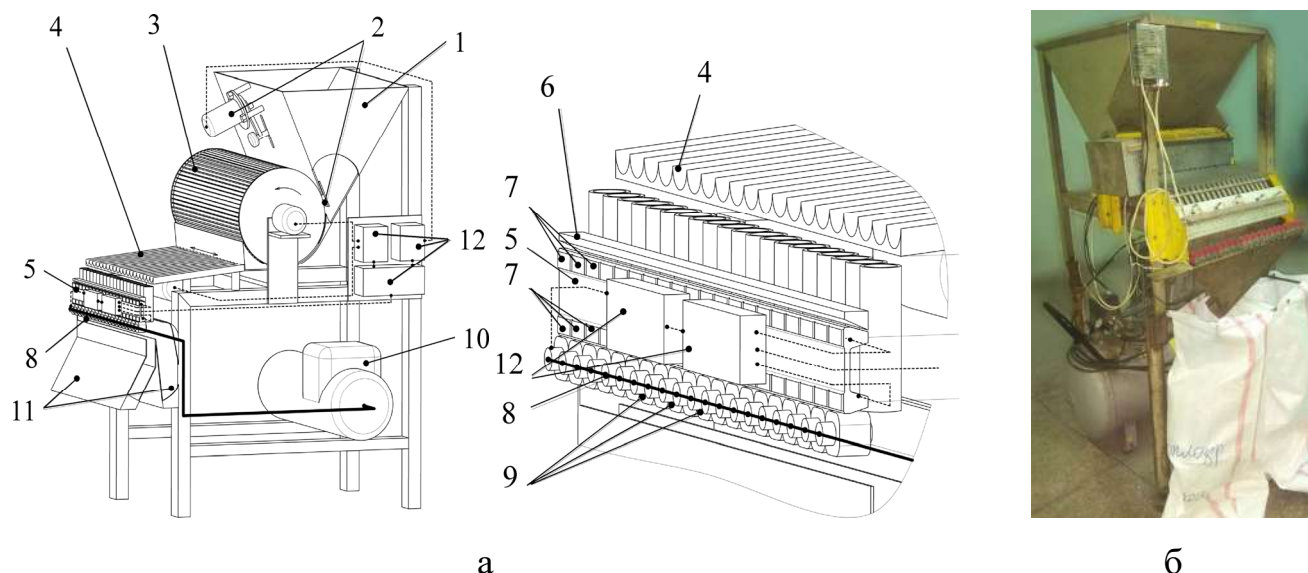
а



б

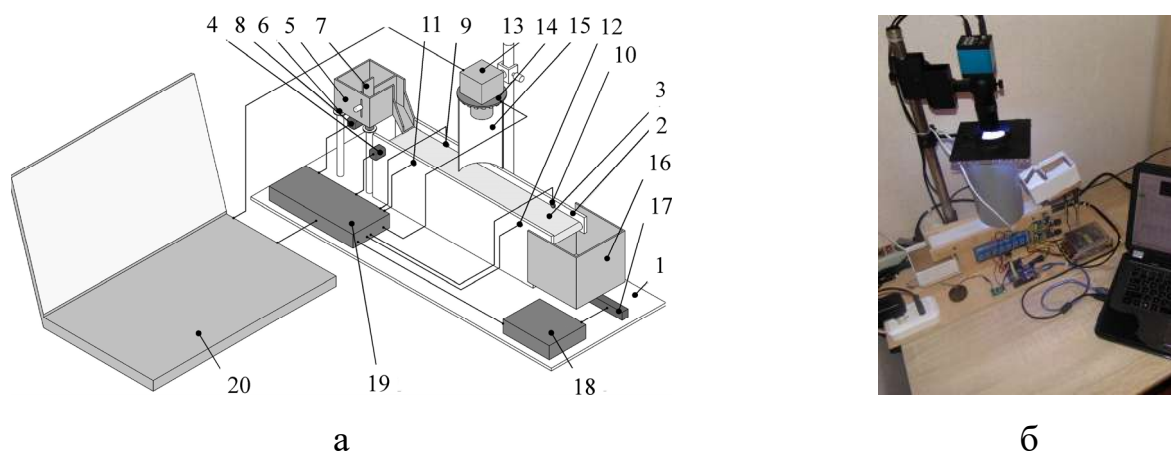
1 – дека; 2 – система регулювання кутів нахилу деки; 3 – вивантажувальні вікна; 4 – вентилятор із електроприводом; 5 – кривошипно-шатунний механізм із електроприводом; 6 – блок подачі насіння; 7 – блок вимірювання об'ємної маси; 8 – тензометричні датчики; 9 – заслінка; 10 – штовхаючий електромагніт (соленоїд); 11 – пружини розтягування; 12 – інфрачервоний діод і фотоприймач; 13 – блоки керування; 14 – персональний комп'ютер

Рисунок 1.9 – Конструктивно-технологічна схема (а) і загальний вигляд (б) експериментального зразка адаптивного вібророздувального сепаратора [6]



1 – бункер; 2 – заслінка із кроковим електродвигуном; 3 – барабан із радіальними лопатями з електроприводом; 4 – віброток із вібродвигуном; 5 – блок реєстрації насіння; 6 – освітлювач; 7 – реєструючі і контролюючі фотоприймачі; 8 – блок виходу насіння; 9 – газові форсунки; 10 – компресор із повітряним ресивером; 11 – забірники ліквідних і неліквідних насінин; 12 – блоки керування

Рисунок 1.10 – Конструктивно-технологічна схема (а) і загальний вигляд (б) експериментального зразка удосконаленого фотоелектронного сепаратора [6]



1 – рама; 2 – стрічковий транспортер; 3 – стрічка; 4 – електродвигун; 5 – лоток подачі насіння; 6 – гумові амортизатори; 7 – регульована заслінка; 8 – вібродвигун; 9, 10 – інфрачервоні світлодіоди; 11, 12 – фотоприймачі; 13 – фотокамера; 14 – RGB-світлодіоди; 15 – труба із світлонепроникного матеріалу; 16 – приймальний лоток; 17 – тензодатчик; 18 – підсилювач; 19 – блок керування; 20 – персональний комп'ютер

Рисунок 1.11 – Конструктивно-технологічна схема (а) і загальний вигляд (б) макетного зразка стрічкового пристрою для автоматичного фенотипування насіння [6]

Представлений аналіз дає змогу стверджувати про необхідність удосконалення трієрних сепараторів, базуючись на автоматизованому керуванні його параметрами з використанням фото- або відео-фіксації процесу сепарації насіннєвого матеріалу із подальшою обробкою.

1.3.3 Принцип роботи чарункового циліндричного трієра

В якості відмінної фізичної характеристики в чарунковому циліндрі використовується довжина насіння. Зазвичай насіннєвий матеріал, що направляється до машини, розділяється на 2 групи: «довге» насіння та «коротке». Чарункові циліндричні машини відомі, як трієри. Вони виконують процес сортування насіння за довжиною.

Рис. 1.12 представляє собою графічне зображення процесу ідеального розділення в чарунковому циліндрі за довжиною. Зверху розташований графік двох нормальних розподілень із різними середніми та стандартними відхиленнями. Це приклади можливого розподілення насіння за довжиною у вхідній суміші.

У центрі розташоване коло, що зображує чарунковий циліндр. Процес очищення залежить від декількох параметрів: насіннєва суміш, налаштування машини, а також перешкоди, що можна виміряти та не можна (контрольовані та неконтрольовані).

Вхідна суміш двокомпонентна – «довгі» та «короткі» насінини. Останні 2 графіка розділення показують два індивідуальні розділення «довгих» і «коротких» насінин на окремі складові.

Сценарій, зображений на рис. 1.12 дуже спрощений і його можна визнати нереальним. Розділення вхідного матеріалу за довжиною в більшості випадків не може бути статистично змодельованим, як ідеальна двокомпонентна суміш «довгих» та «коротких» насінин. Більш реалістичний спосіб статистичного моделювання розділення вихідного матеріалу за довжиною – використання розділення суміші нормальних випадкових величин із відповідною щільністю суміші.

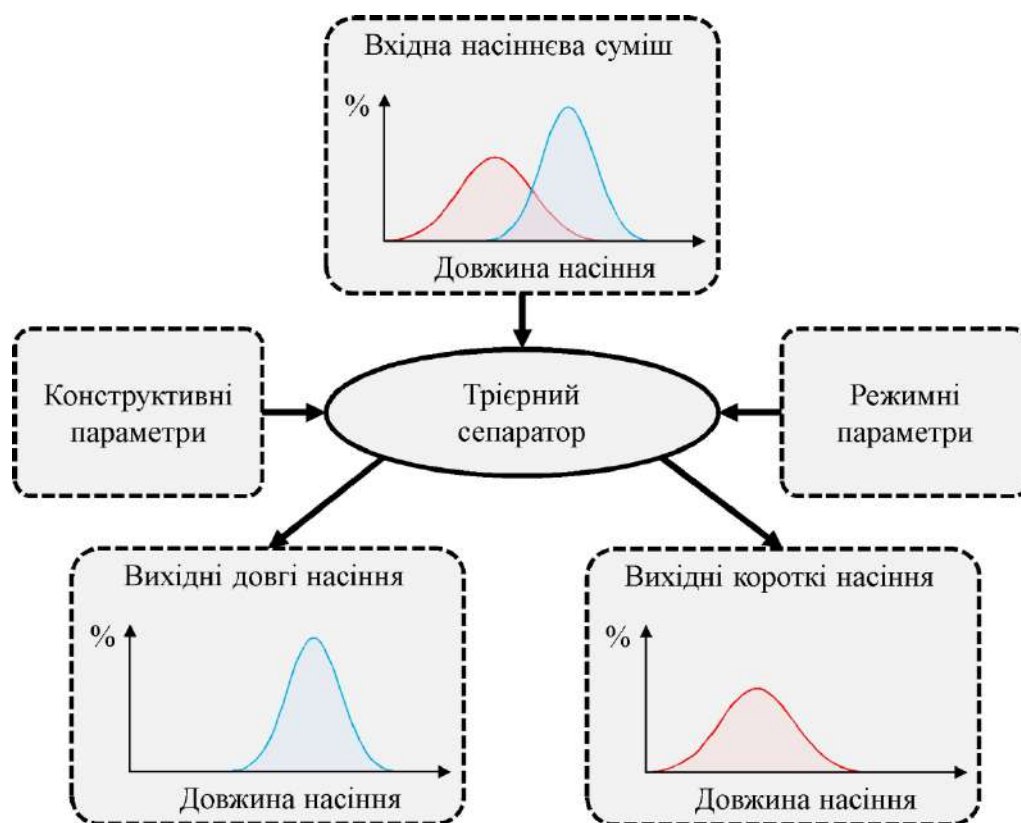


Рисунок 1.12 – Концептуальна модель процесу роботи чарункового трієрного сепаратора

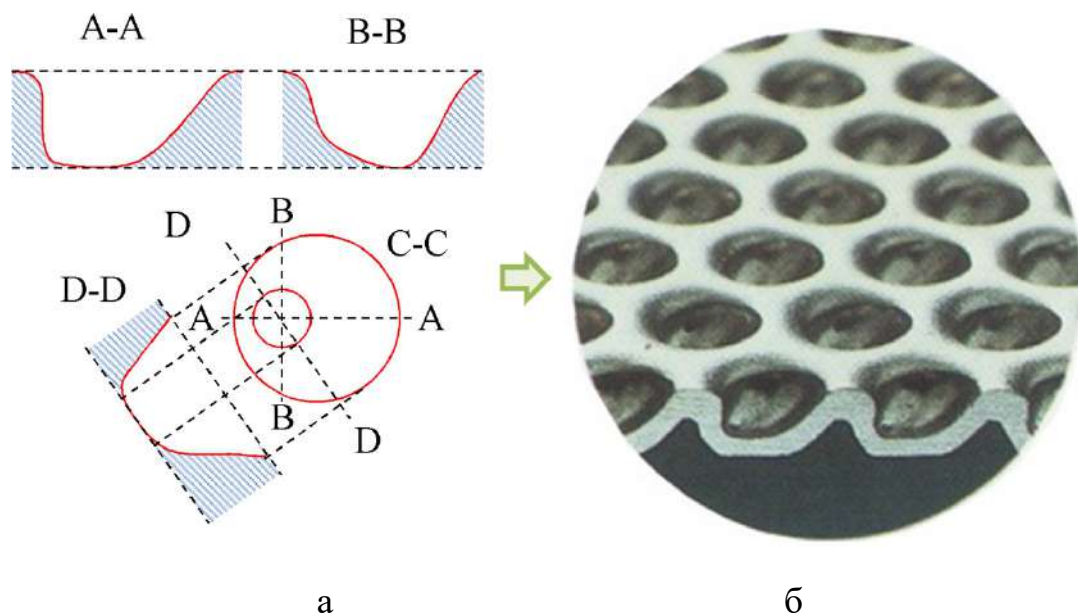
Робочим органом циліндричного чарункового трієра є похилий сталевий циліндр з чарунками конкретної форми та розміру. Ці чарунки щільно розташовані на внутрішній поверхні циліндра. Такий циліндр зазвичай виготовляють зі сталюого листа, що має на поверхні поглиблення.

Циліндри мають поглиблення з ідентичними геометричними розмірами або близькі до тих, що зображені на рис. 1.13.

Огляд принципу роботи трієрного циліндричного сепаратора представлений на рис. 1.14. Поки циліндр обертається із постійною швидкістю, насіння поступає до циліндра безперервно з піднятого кінця (наприклад, за допомогою віброживильника). Насіння падає на дно циліндра, де в подальшому утворюється шар насіння.

Вхідний матеріал складається з насіння та інших крупних компонентів, які не поміщаються у чарунки. У такому випадку на них впливає тертя з поверхнею

циліндра між чарунками. Як варіант, вони можуть поміститися, але через їхню більшу довжину центр ваги не буде знаходитись у чарунках. Ці два сценарії, як правило, призводять до низького рівня спокою під час обертання.



а – геометрія штампованих чарунок у формі краплі на внутрішній поверхні циліндра; б – фотографія чарунок у формі краплі

Рисунок 1.13 – Геометрія та фото проштампованих чарунок у формі краплі на внутрішній поверхні циліндра

Інші насінини та інша дрібна фракція (пил, бите насіння) досить малі і не поміщаються у чарунки (де вони б знаходились у стані спокою деякий час, перед тим, як випасти з чарунок). Особливо це стосується насіння з довжиною, рівною або меншою за глибину чарунки. Центр ваги таких насінин, як правило, знаходиться всередині чарунок, а значить насінина надійно закріплена в чарунці під час обертання.

Наступні дві фракції матеріалу, утворені під час безперервного обертання циліндра. «Непіднята» фракція – фракція матеріалу з низькою опорою в стані спокою в чарунці при обертанні. Насіння в цій фракції переноситься за напрямком обертання циліндра та під певним кутом випадає з чарунки. Ця частина вихідних

даних називається невибраною фракцією. «Піднята» фракція – фракція матеріалу з високою опорою в стані спокою під час обертання. Під час обертання насінини знаходяться в чарунках до певного кута вильоту, після досягнення якого насінини випадають із чарунок. Така фракція називається піднятою. Як правило, через різницю опори в стані спокою $\Theta_{\text{довге}}$ менше, ніж $\Theta_{\text{коротке}}$. Звідси назва «піднята» і «непіднята». Це очікуване фізичне явище згадується, як «явище підйому».

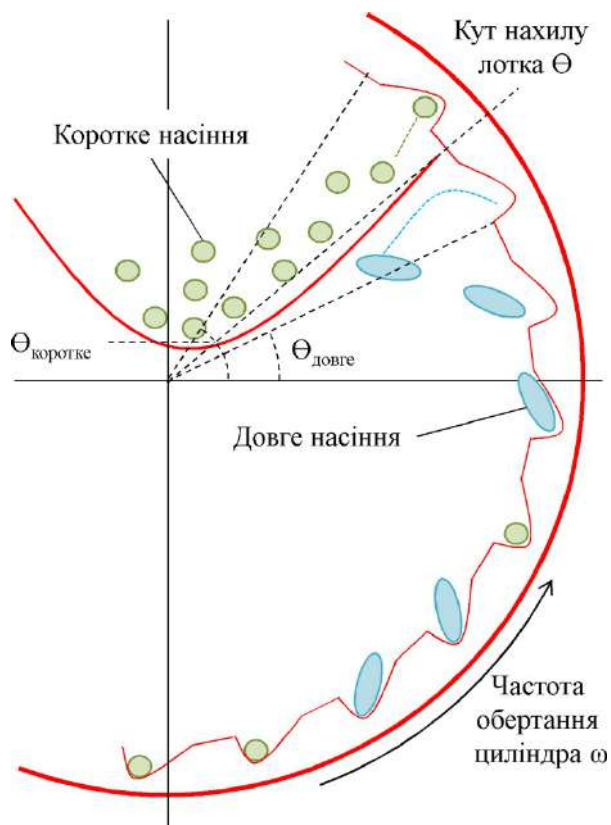


Рисунок 1.14 – Циліндр з чарунками, вид спереду

(накладений графік показує кути «довгих» та «коротких» насінин, при яких насінини випадають з чарунок циліндра за параболічною траєкторією)

Чарунковий циліндр також оснащений збірним бункером, що встановлений на осьовій опорі циліндра. Цей збірний бункер регулюється та має робочий кут із горизонталлю.

Частинки «піднятої» фракції з внутрішньої поверхні циліндра випадають і потрапляють до збірного бункера за умови, що його робочий кут для цього був

правильно відрегульований. Ці захоплені частинки, що класифікуються, як «короткі» насінини, переносяться та виводяться із загальної маси. Частинки «непіднятої» фракції не потрапляють до збірного бункера. Ці частинки класифіковані, як «довгі» насінини, падають на дно циліндра і виводяться з похилого циліндра через нижній кінець.

Важливим моментом є відмінність між процесами розділення і сортування. Процес розділення – розділення за довжиною, що виконується шляхом обертання чарункового циліндра. Процес сортування – результат уловлювання збірним бункером «піднятої» фракції і пропускання «непіднятої» фракції.

Внутрішня поверхня циліндра з чарунками є важливою частиною машини, і ця частина відповідає за фактичне розділення «піднятої» і «непіднятої» фракцій. Таким чином, ефективність розділення не залежить від існуючого збірного бункера, який працює як форма регульованої пам'яті внутрішньої поверхні циліндра. Можливість сортування з іншого боку залежить від збірного бункера, оскільки без нього ефективність розділення швидко «зникає».

Щоб зробити висновок про правильність розділення «довгих» та «коротких» насінин, потрібно знати фактичні дані вихідного матеріалу. Іншими словами, оператор обладнання повинен знати, який результат сортування повинен бути. Наприклад, якщо вихідний матеріал складався з суміші цілого і битого зерна ячменю, оператор очікує в «короткій» фракції бите зерно, а ціле зерно – в «довгій» фракції.

Визначення формальних показників продуктивності циліндричного чарункового трієра не є тривіальним. Оптимальним результатом сортування може бути, такий, що має мінімальне «перекриття» розподілу насіння між двома вихідними підгрупами у вихідному матеріалі. Це можна розглядати, як форму «критерію оптимальності» для чарункового циліндра. «Перекриття» можна визначити, як кількість «коротких» насінин, що потрапили до «довгих», плюс кількість «довгих» насінин, що потрапили до «коротких».

1.3.4 Аналіз конструкцій чарункових циліндричних трієрів

Циліндричні трієри доступні у двох різних масштабах: промисловий та лабораторний масштаб.

Серед промислових циліндричних трієрів найвідомішими є трієри марки БТС, БТХМ, БТС, сучасні трієри серії Westrup A / S, TR (рис. 1.15-1.16) та трієри бренду «Cimbria».



Рисунок 1.15 – Промисловий циліндричний чарунковий трієр (серія Westrup A / S, TR) з дверцятами та без



Рисунок 1.16 – Лабораторний циліндричний чарунковий трієр (модель Westrup LA-T)

На рисунку 1.17 показана схема лабораторного чарункового трієра. Даний трієр складається з таких елементів: циліндра 1 (його іноді називають безпосередньо

мантією машини з чарунками); ручки 2, яка використовується для послаблення збірного бункера та регулює його кут. Збірний бункер встановлений на осьовій опорі, як показано на рисунку. Вібраційний живильник 3 необхідний для введення безперервного потоку матеріалу в циліндр. Схема на рисунку 1.17 показує, як насіння падає з вібраційного живильника і потрапляє до циліндра. Вимикачі 4 використовуюються для управління вібраційною подачею (зверху) та швидкістю обертання (знизу). Швидкість обертання регулюється натягом ремня приводу циліндра. Це було здійснено фізично шляхом зміни положення електродвигуна за допомогою ручки. Швидкість обертання є важливою незалежною величиною в експериментах і, таким чином, змінювалася багато разів.

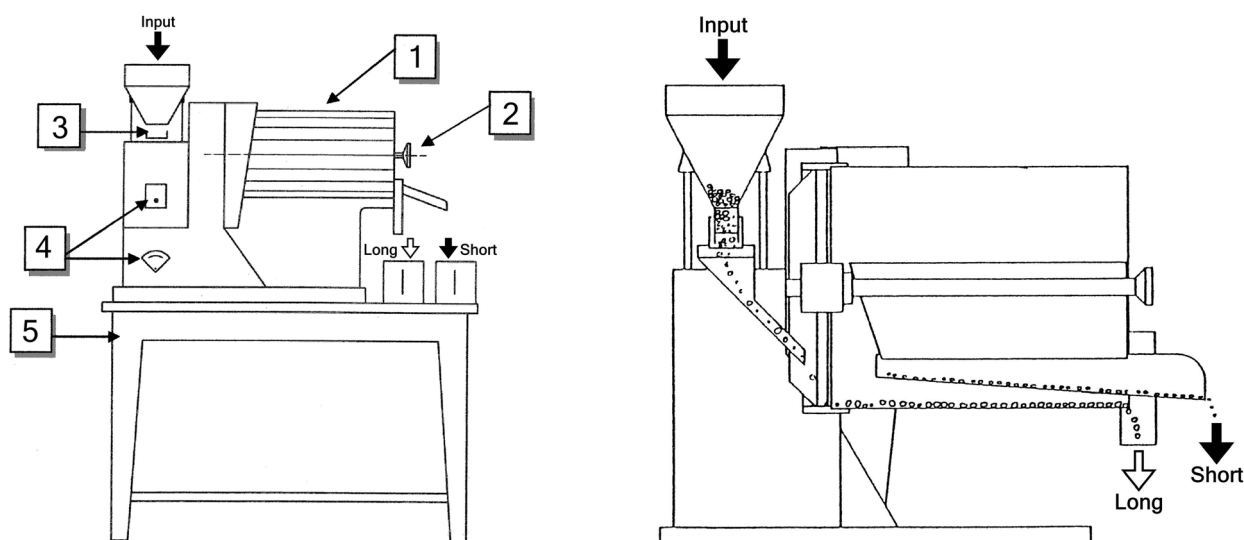


Рисунок 1.17 – Технічні зображення лабораторного чарункового трієра

За конструктивним виконанням основних робочих органів трієри підрозділяють на дискові та циліндричні. Дискові трієри знайшли широке застосування на підприємствах, оскільки мають високу продуктивність при невеликих габаритах та характеризуються високою технологічною ефективністю.

Дискові трієри мають декілька переваг: вони продуктивні за невеликих габаритних розмірів. Недоліками дискових трієрів є механічний знос дисків внаслідок їх стирання у шарі насіння, лущення насіння внаслідок тертя об поверхню

дисків, чутливість до твердих домішок – наявність піску в насінні та накопичення його на дні корпуса може призвести до виходу з ладу машини.

Також розповсюдженими машинами є циліндричні трієри [93]. Їхнім робочим органом є циліндр, що обертається. На внутрішній поверхні циліндра виштамповані чарунки певної форми. Циліндричні трієри виготовляють у вигляді як самостійних одиниць, так і у вигляді робочих органів сільськогосподарських машин. Залежно від значення обертової швидкості, циліндричні трієри можуть бути класифіковані як тихохідні або швидкохідні. Тихохідні трієри доступні з зовнішнім сітчастим циліндром або без нього. Вони використовуються для очищення насіння від довгих і коротких домішок, а також для сортування його за товщиною. Швидкохідні трієри використовуються для контролю відходів. Трієрні машини, що розраховані та використовуються для очищення занадто великого об'єму насіння [94, 95], мають дуже складну конструкцію та для селекції і насінництва не підходять.

Циліндричний трієр, що використовується в деяких селекційних закладах України, складається з рами, бункера, вібрлотка живильника, трієрного жолоба, встановленого всередині трієрного циліндра зі штовхачем, який взаємодіє із зигзагоподібною канавкою кільця, закріпленого на трієрному циліндрі та обертається з ним [96].

Найсучаснішими циліндричними трієрами є трієри бренду «Cimbria» (рис. 1.18). Циліндричні чарункові трієри цього виробника використовуються для сепарації всіх насінневих сумішей за ознакою довжини. Перевагою є те, що розміри насіння, яке сепарується, можуть коливатися від 1,0 мм до 24 мм, а сам трієр багатофункціональний.

Бренд «Cimbria» має більше 40 моделей циліндричних чарункових трієрів, які відрізняються кількістю та діаметром циліндрів, що обертаються, потужністю, та габаритами.

Порівняльна характеристика циліндричних трієрів марок УТК, БТС, БТХМ та «Cimbria» наведена в таблиці 1.2.



а – циліндричний трієр бренду «Cimbria», модель HSR 1010–16010 L



б – циліндричний трієр бренду «Cimbria», модель HSR 1020–16020 R-L

в – циліндричний трієр бренду «Cimbria», модель HSR 1030–16030 R-L

Рисунок 1.18 – Циліндричні трієри бренду «Cimbria»

Таблиця 1.2 – Порівняльна характеристика циліндричних трієрів

Показники	Марка					
	УТК	БТС	БТХМ	HSR 1010 - 16010	HSR 1020 - 16020	HSR 1030 - 16030
Продуктивність, т/год	8,3	5	1,5-2,5	0,4-16	0,4-16	0,4-16
Кількість циліндрів	1	1	1	1	2	3
Розміри циліндра, мм:						
зовнішній діаметр	792	800	500	400-900	400-900	400-900
довжина	1784	1784	2000	1000-4000	1000-4000	1000-4000
Встановлена потужність електродвигуна, кВт	2,2	2,8	0,55	0,37 – 4,0	2x0,37 – 2x4,0	3x0,25 – 3x4,0
Габаритні розміри, мм						
довжина	2292	2292	2280	1760 – 5325	2107 – 5775	2107 – 5775
ширина	1034	1034	785	640 – 1202	640 – 1205	640 – 1205
висота	1415	1415	950	620 – 1240	1240 – 2480	1860 – 3715
Маса, кг	670	670	250	270 – 1315	540 – 2630	810 – 3540

Недоліками циліндричних трієрів є невисока ефективність у зв'язку з тим, що вони потребують спеціального налаштування для оптимального режиму його роботи для очищення насіння різноманітних сільськогосподарських культур, змінюється також частота коливання трієрного жолоба, який виводить насіння з трієрного циліндра, а при зменшенні частоти коливання жолоба зменшується або зовсім призупиняється його транспортна здатність. Тому такий трієр неможливо використовувати для очищення складних насінневих сумішей, які необхідно розділити за допомогою невеликих обертів трієрного циліндра. Ще одним недоліком є малий термін роботи привідних та підтримуючих роликів, зібраних у вигляді пакетів з плоских прогумованих дисків. У результаті зносу контактних поверхонь роликів порушується плавність ходу трієрів, що є причиною вібрації та зниження ефективності сепарування. Ще одним суттєвим недоліком циліндричних трієрів є велика потужність і як наслідок високі енергозатрати.

1.3.5 Попередні дослідження процесу сепарації насіння на чарунковому циліндричному трієрі

Для усунення недоліків циліндричних трієрів науковцями з різних країн була проведена велика кількість досліджень.

У роботі [97] представлено відносно прості моделі руху насіння в чарунковому циліндрі. У цих моделях насінина моделюється, як безрозмірне тіло. Крім того, моделювання проводиться тільки у двох вимірах – за умови, що рух насінини обмежений площиною, що перпендикулярна осі обертання циліндра. Зазвичай використовуються два основні варіанта: діаграми сил, що діють на насінину між чарунками та всередині чарунки. Активний елемент чарунок спрощений до невеликої площі більш похилої поверхні. Подія, коли насіння залишає поверхню або чарунку, виражається тривіальними еквівалентами сил, що включають сили тертя та сили нормального тиску (залежно від швидкості обертання циліндра ω та прискорення вільного падіння g).

У дослідженнях [98] також представлено більш складну модель для «довгих» та «коротких» насінин всередині чарунки. Ця модель враховує точки опори в чарунці, які будуть відрізнятися для кожного типу насіння. Ці моделі дають визначення для $\Theta_{\text{довге}}$ та $\Theta_{\text{коротке}}$. Більш того, враховуючи те, що вони залежать від конкретних біологічних параметрів (довжина насінин, коефіцієнт тертя, вологість та ін.) вірогідно, що діапазони $\Theta_{\text{довгого}}$ і $\Theta_{\text{короткого}}$ перетинаються, що ускладнює повне розділення.

Спостереження, ідентифікація системи та моделювання існуючих пристроїв для сортування насіння, таких як чарунковий циліндричний трієр, за допомогою такої сучасної технології, як комп'ютерне сканування та інших комп'ютерних технологій, приділяли певну увагу в пізніші роки, хоча і обмежено.

Основи сучасної конкретної літератури з аналізу циліндричних трієрів представлені такими роботами:

В роботі [98] автор вніс свій вклад у ранній та важливий аналіз, мабуть, найскладнішого і найменш зрозумілого параметра чарунки циліндра – аналіз чарунок циліндричної форми (в роботі описані, як клітинки). У висновках надано рекомендації щодо найоптимальніших діапазонів параметрів форми чарунок.

У роботі [99] дослідник продовжив удосконалювати чарунковий циліндричний трієр. Розроблений новий чарунковий пристрій (в лабораторному масштабі), оснащений перфорованим металом з чарунками круглої форми. Нова модель була оснащена самоочищувальним пристроєм у вигляді щітки, що оберталась разом із циліндром та видаляла насіння, що залишалось у чарунках. У висновках згадується, що на розділення впливали головним чином швидкість обертання циліндра ω , нахил циліндра, а також робочий кут збірного бункера α .

У роботі [100] вчені зробили кілька цікавих та ранніх спроб досягти відтворюваного набору правил («система підтримки прийняття рішень») для розділення за довжиною з використанням чарункового циліндричного трієра (масштабований в лабораторії). Було використано три різні швидкості обертання ω , три різні робочі діаметри чарунок d (тут називаються «кишеннями» замість «чарунок») і три різні робочі кути збірного бункера α . Для вимірювання довжини попередньо очищеної пшениці Стівенса застосували систему раннього комп'ютерного аналізу. Автори

дійшли висновку, що всі три параметри мали значний вплив на розділення за довжиною насіння у «піднятій» фракції («коротке» насіння) та не мали значного впливу на розділення за довжиною насіння у «непіднятій» («довге» насіння) фракції.

У роботі [101] циліндричний чарунковий трієр (лабораторно масштабований) використано для пошуку оптимальних умов роботи щодо видалення розбитого рису. Було використано 41 різних сортів рису, три різних робочі діаметри відступу D та три різних налаштування робочого кута збірного бункера α (швидкість обертання ω , вірогідно, не змінювалася). Робота була підсумована шляхом надання рекомендацій щодо робочого діаметра чарунок для різних сортів рису.

Огляд важливих законів механіки що регулюють рух «довгих» та «коротких» насінин у циліндрі з чарунками представлено у роботі [102].

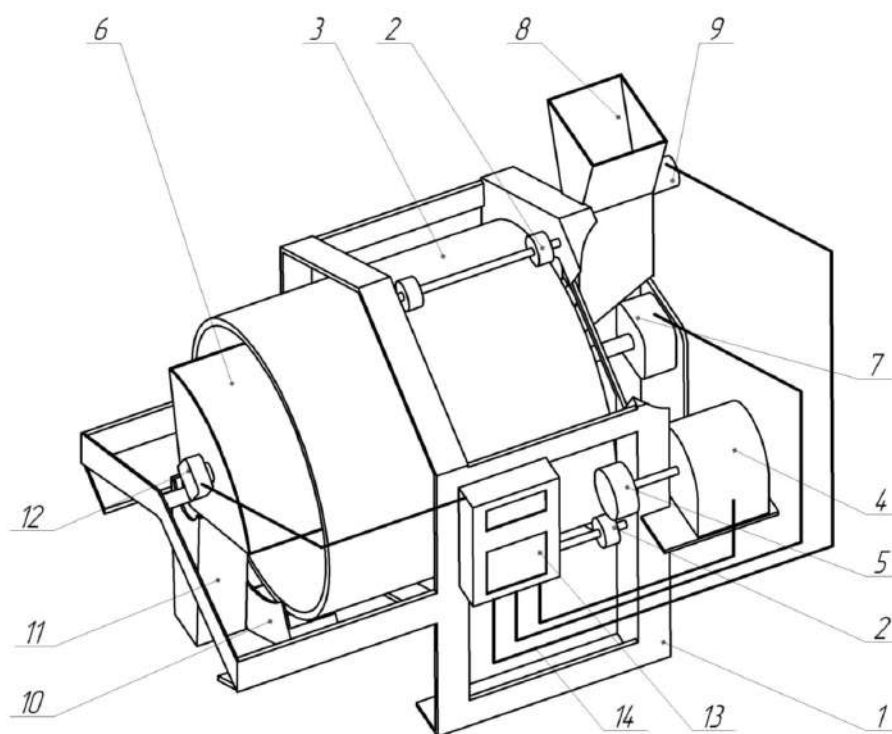
Ця робота [103] є надзвичайно актуальною і містить кілька важливих висновків. Швидкісна камера була встановлена перед лабораторно масштабованим циліндром з чарунками. Застосовано використання змінних із самих чарунок для побудови фізичної моделі, що використовується для моделювання кута падіння та параболічних траєкторій «коротких» насінин (домішок). Показана хороша кореляція між моделлю та реальністю, і це незважаючи на спрощення припущень в математичній моделі, таких як використання точкових мас та нехтування будь-якими силами опору насіння.

Оскільки науковцям проводились дослідження універсальних очисних машин, а в галузі очищення різних сортів насіння дрібнонасінневих культур дослідження не проводились, актуальною задачею залишається удосконалення існуючих технічних засобів для сепарації шляхом створення мехатронних систем автоматизованого керування їх конструктивно-режимними параметрами.

1.4 Обґрунтування конструктивно-технологічної схеми мехатронної системи трієрного сепаратора

Для вирішення даної задачі запропоновано конструктивно-технологічну схему мехатронної системи трієрного сепаратора (рис. 7), який складається з рами 1, в якій встановлені підтримуючі ролики 2. В середину рами на роликах встановлено барабан із

чарунками 3. На рамі 1 на задній частині встановлено мотор-редуктор 4, вал якого через привідний ролик 5 дотикається до барабану із чарунками 3. В середині барабану із чарунками 3 встановлено лоток 6, який закріплено до рами 1 під горизонтальним кутом із можливістю обертатися навколо своїх вісі. Задня частина лотка 6 кріпиться до валу крокового двигуна 7, яких жорстко встановлено на рамі 1. На рамі 1 на задній частині встановлено бункер-дозатор 8, який дозує насіннєву суміш за допомогою заслінки із кроковим двигуном 9. На рамі 1 на передній частині під барабаном із чарунками 4 встановлено забірник більшого насіння 10, під лотком 6 забірник меншого насіння 11. На передній частині лотка 6 встановлено фотокамеру 12, об'єктив якої направлений в середину барабана із чарунками 3. На рамі 1 закріплено блок керування 13. До блока керування 13 по засобах електричних проводів 14 підключено мотор-редуктор 4, кроковий двигун 7, кроковий двигун заслінки 9 і фотокамера 12.



1 – рама; 2 – підтримуючі ролики; 3 – барабан із чарунками; 4 – мотор-редуктор; 5 – привідний ролик; 6 – лоток; 7 – кроковий двигун; 8 – бункер-дозатор; 9 – заслінка із кроковим двигуном; 10 – забірник більшого насіння; 11 – забірник меншого насіння; 12 – фотокамера; 13 – блок керування; 14 – електричні проводи

Рисунок 1.19 – Конструктивно-технологічна схема мехатронної системи трієрного сепаратора

Відмінність запропонованої мехатронної система трієрного сепаратора від традиційного полягає в тому, що фотокамера 12 фіксує траєкторію польоту насінин.

Ця інформація обробляється в блоці керування, який в свою чергу змінює частоту обертання мотор-редуктора 4 і як наслідок барабана із чарунками 3, кут нахилу лотка 6, кут повороту заслінки із кроковим двигуном 9 бункера-дозатора 8. Дані маніпуляції із режимними параметрами трієрного сепаратора дозволяє підлаштувати його до зміни складу насінневої суміші, тим самим підвищуючи якість сепарації. Окрім цього, через автоматичне підлаштування режимних параметрів трієрного сепаратора, участь оператора установки в процесі сепарації практично нівелюється, що зменшує трудові витрати.

1.5 Висновки з розділу

1. Під час аналізу було встановлено, що селекційний процес в насінництві олійних культур висуває специфічні вимоги до технологічних операцій очищення, розділення і сепарації насінневого матеріалу. Серед цих вимог: сортова чистота насінневого матеріалу повинна бути на рівні 98,0–99,9 % для елітного насіння (еліта, супереліта); втрати, що виникають під час збирання та очищення, не повинні перевищувати 1,5 % для базового насінництва та 0,1 % – для добазового; технічні засоби, що використовуються для технологічних операцій очищення, розділення і сепарації, повинні бути повністю очищені від генетичного матеріалу попереднього доопрацювання; машини повинні мати високу вибіркочу продуктивність, систему автоматизованого управління і контролю якості роботи; технологічне обладнання повинно бути екологічно безпечним як для персоналу, так і для навколишнього середовища.

2. Представлений аналіз прецензійного технічного забезпечення процесу сепарації насінневого матеріалу дрібнонасінневих культур дає змогу стверджувати про необхідність удосконалення трієрних сепараторів базуючись на

автоматизованому керуванні його параметрами з використанням фото- або відео-фіксації процесу сепарації насіннєвого матеріалу із подальшою обробкою.

3. Встановлено, що визначення формальних показників продуктивності селекційно-насінницького трієра не є тривіальним. Оптимальним результатом сортування може бути, такий, що має мінімальне «перекриття» розподілу насіння між двома вихідними підгрупами у вихідному матеріалі. Це можна розглядати, як форму «критерію оптимальності» для чарункового циліндра. «Перекриття» можна визначити, як кількість «коротких» насінин, що потрапили до «довгих», плюс кількість «довгих» насінин, що потрапили до «коротких»

4. За результатами аналізу розроблено конструктивно-технологічну схему селекційно-насінницького трієра у складі мехатронної системи. Відмінність запропонованої конструкції від традиційної полягає у фіксації фотокамерою траєкторії польоту насінин та обробці цієї інформації, що в подальшому дозволяє змінювати частоту обертання мотор-редуктора і як наслідок циліндра із чарунками, кут нахилу лотка, кут повороту заслінки із кроковим двигуном бункера-дозатора. Керування режимними параметрами селекційно-насінницького трієра дозволяє підлаштовувати його до зміни складу насіннєвої суміші, що підвищує якість сепарації і зменшує втрати ліквідного насіння.

1.6 Мета і задачі досліджень

Метою досліджень є підвищення ефективності процесу сепарації насіннєвого матеріалу дрібнонасінневих культур шляхом розробки конструкції селекційно-насінницького трієра у складі мехатронної системи із обґрунтованими конструктивно-технологічними параметрами, що забезпечують задану прецизійність.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішення наступних **задач**:

– провести аналіз техніко-технологічного забезпечення процесу сепарації насіннєвого матеріалу дрібнонасінневих культур за геометричними розміром

і обґрунтувати конструктивно-технологічну схему відповідного селекційно-насінницького трієра у складі мехатронної системи;

– провести аналітичні дослідження процесу взаємодії компонентів насінневої суміші дрібнонасінневих культур із робочим органом селекційно-насінницького трієра;

– провести чисельне моделювання процесу сепарації насінневого матеріалу дрібнонасінневих культур на селекційно-насінницькому трієрі і встановити відповідні закономірності впливу його конструктивно-режимних параметрів на якість процесу сепарації;

– розробити методикау і провести експериментальних досліджень процесу сепарації дрібнонасінневих культур на селекційно-насінницькому трієрі у складі мехатронної системи та встановити відповідні закономірності процесу її роботи;

– провести випробування і визначити економічну ефективність розробленого селекційно-насінницького трієра у складі мехатронної системи та впровадити результати досліджень у виробництво.

Основні наукові результати розділу опубліковано в працях автора [104, 105, 106, 107].

2 ТЕОРЕТИЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ СЕЛЕКЦІЙНО-НАСІННИЦЬКОГО ТРІЄРА

2.1 Дослідження процесу взаємодії компонентів насінневої суміші із робочим органом селекційно-насінницького трієра

Аналіз наукових досліджень [108, 109, 110, 111] показав, що форма і розміри чарунок трієрів є достатньо обґрунтованими і оптимізованими. Згідно досліджень [112] використання полімерних композиційних матеріалів відкрило можливість виготовлення нових форм чарунок для сортування різних культур. Однак в цих роботах недостатньо уваги приділено дослідженням режимних параметрів роботи трієрів, що можуть змінюватися під час процесу сепарації в залежності від складу вхідної насінневої суміші.

Тому першим етапом теоретичних досліджень є визначення діапазонів режимних параметрів селекційно-насінницького трієра. Для цього розглянемо аналітично процес взаємодії компонента насінневої суміші із чарункою. Геометричні розміри чарунок згідно досліджень [112] приймаємо відповідно до рис. 2.1.

Приймаємо наступні припущення і спрощення:

- компонент насінневої суміші є абсолютно не пружним тілом;
- тертям компонентів насінневої суміші один об одного нехтуємо;
- величиною опору повітряного середовища нехтуємо;
- компонент насінневої суміші має форму еліпсоїда обертання [113, 114, 115];
- задачу розглядаємо у площині, що перпендикулярна осі циліндра трієра.

Складемо розрахункову схему (рис. 2.2) процесу переміщення компонента насінневої суміші в чарунці селекційно-насінницького трієра.

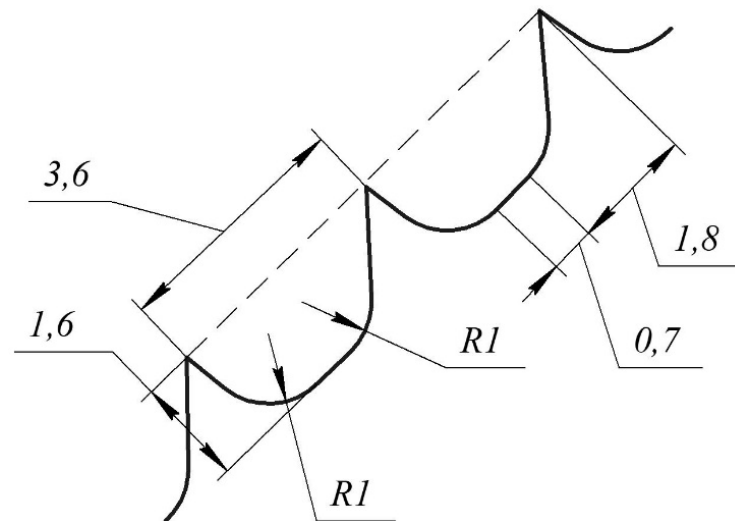


Рисунок 2.1 – Геометричні розміри чарунок селекційно-насінницького трієра (в мм)

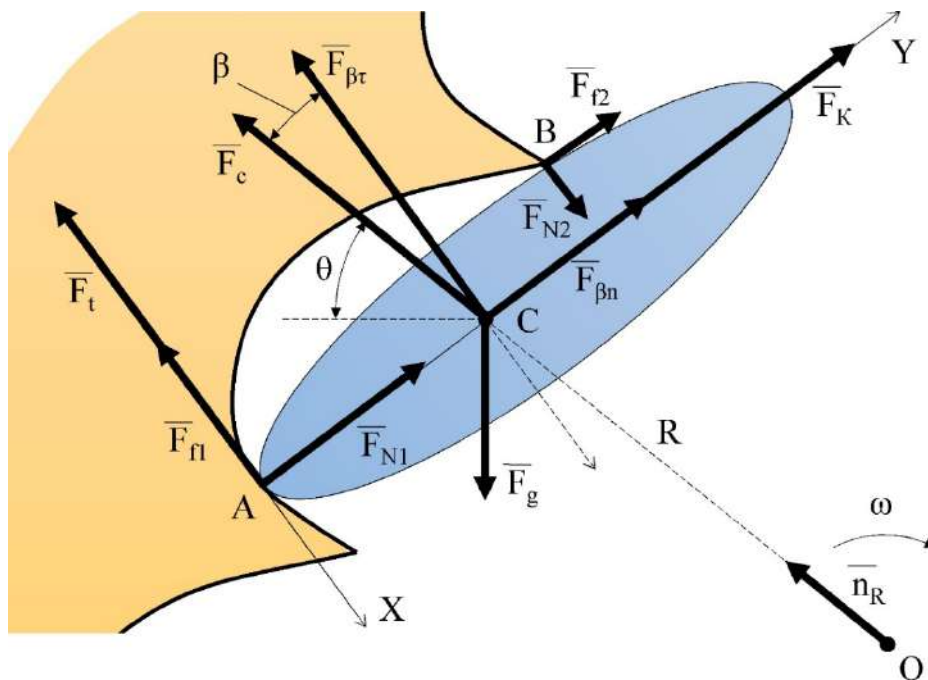


Рисунок 2.2 – Розрахункова схема процесу переміщення компонента насінневої суміші в чарунці селекційно-насінницького трієра

На компонент насінневої суміші діють наступні сили.

1. Сила тяжіння:

$$\bar{F}_g = m\bar{g}, \text{ Н}; \quad (2.1)$$

де m – маса компонента насінневої суміші, кг;

g – прискорення вільного падіння, м/с^2 .

2. Відцентрова сила інерції:

$$\overline{F}_c = m\omega^2 R \overline{n}_R, \text{ Н}; \quad (2.2)$$

де ω – кутова швидкість обертання циліндра трієра, с^{-1} :

$$\omega = \frac{2\pi n}{60}; \quad (2.3)$$

n – частота обертання циліндра трієра, об/хв.;

R – відстань від центра мас C компонента насінневої суміші до осі обертання циліндра O (в першому наближенні відповідає радіусу циліндра трієра), м:

$$R = \frac{D}{2}; \quad (2.4)$$

D – діаметр циліндра, м;

\overline{n}_R – одиничний вектор, що визначає положення компонента насінневої суміші в полярній системі координат відносно O .

3. Тенденційна сила інерції

$$\overline{F}_{\beta\tau} = m\ddot{\beta} l_c \overline{\tau}_\beta, \text{ Н}; \quad (2.5)$$

де β – кут відхилення центра мас C компонента насінневої суміші відносно одиничного вектору \overline{n}_R ;

l_c – відстань від центра мас C компонента насінневої суміші до місця контакту з чарункою A , м;

$\overline{\tau}_\beta$ – одиничний вектор, що визначає орієнтацію компонента насінневої суміші в полярній системі координат відносно C .

4. Нормальна сила інерції

$$\overline{F}_{\beta n} = m\dot{\beta}^2 l_c \overline{n}_\beta, \text{ Н}; \quad (2.6)$$

де \overline{n}_β – одиничний вектор, який ортогональний вектору $\overline{\tau}_\beta$.

5. Кориолісова сила інерції

$$\overline{F}_k = 2m\omega\dot{\beta} l_c \overline{k} \times \overline{\tau}_\beta, \text{ Н}; \quad (2.7)$$

де \overline{k} – одиничний вектор, що направлений вздовж осі обертання.

6. Нормальна реакція опори чарунки \overline{F}_N .

7. Сила тертя компонента насінневої суміші о поверхню чарунки

$$|\overline{F}_f| = f |\overline{F}_N|, \text{ Н}; \quad (2.8)$$

де f – коефіцієнт тертя насінневої суміші о поверхню чарунки.

8. Сила тертя кочення компонента насінневої суміші

$$|\overline{F}_t| = \frac{f_t}{l_c} |\overline{F}_N|, \text{ Н}; \quad (2.9)$$

де f_t – коефіцієнт тертя кочення компонента насінневої суміші о поверхню чарунки, м.

У граничний момент відносної рівноваги компонента насінневої суміші, сума сил, що діють на центр мас С дорівнюватиме нулю:

$$\begin{cases} AX : F_g \cos\left(\frac{\pi}{2} - \beta - \theta\right) - F_t - F_{f1} - F_{\beta\tau} - F_c \cos\beta + F_{N2} = 0, \\ AY : F_{N1} + F_{f2} + F_{\beta n} + F_K - F_g \sin\left(\frac{\pi}{2} - \beta - \theta\right) - F_c \sin\beta = 0. \end{cases} \quad (2.10)$$

Сума моментів сил при цьому складає:

$$F_g l_c \cos\left(\frac{\pi}{2} - \beta - \theta\right) - F_c l_c \cos\beta - F_{\beta\tau} l_c + F_{N2} l_B = I_A \ddot{\beta}, \quad (2.11)$$

де l_B – відстань від точки В чарунки до місця контакту компонента насінневої суміші з чарункою А, м;

I_A – момент інерції компонента насінневої суміші (еліпсоїда) відносно точки А, м:

$$I_A = I_C + ml_c^2 = \frac{1}{5} m(l^2 + b^2) + ml_c^2 = \frac{m}{5} (l^2 + b^2 + 5l_c^2) \quad (2.12)$$

l – довжина компонента насінневої суміші, м;

b – ширина компонента насінневої суміші, м.

Зведемо рівняння (2.10) і (2.11) до єдиної системи і підставимо вирази з (2.1)–(2.9):

$$\begin{cases} mg \sin(\beta + \theta) - \frac{f_t}{l_C} F_{N1} - f F_{N1} - m\ddot{\beta} l_C - m\omega^2 R \cos \beta + F_{N2} = 0, \\ F_{N1} + f F_{N2} + m\dot{\beta}^2 l_C + 2m\omega\dot{\beta} l_C - mg \cos(\beta + \theta) - m\omega^2 R \sin \beta = 0, \\ mgl_C \sin(\beta + \theta) - m\omega^2 R l_C \cos \beta - m\ddot{\beta} l_C + F_{N2} l_B = \frac{m}{5} (l^2 + b^2 + 5l_C^2) \ddot{\beta}. \end{cases} \quad (2.13)$$

Виражаючи F_{N1} і F_{N2} з третього і другого рівняння і підставляючи у перше рівняння системи (2.13) маємо диференційне рівняння другого порядку відносно $\beta(t)$:

$$\begin{aligned} & \left[\frac{fl_C (f_t + fl_C)}{l_B} + \frac{l_C^2}{l_B} + \frac{l^2 + b^2 + 5l_C^2}{5l_B} + \frac{f (f_t + fl_C) (l^2 + b^2 + 5l_C^2)}{5l_B l_C} - l_C \right] \ddot{\beta} + \\ & + (f_t + fl_C) \dot{\beta}^2 + \frac{\pi n}{15} (f_t + fl_C) \dot{\beta} + g \sin(\beta + \theta) - \frac{f_t + fl_C}{l_C} g \cos(\beta + \theta) - \\ & - \frac{f_t + fl_C}{l_C} \left(\frac{\pi n}{30} \right)^2 \frac{D}{2} \sin \beta - \frac{f (f_t + fl_C)}{l_B} g \sin(\beta + \theta) + \\ & + \frac{f (f_t + fl_C)}{l_B} \left(\frac{\pi n}{30} \right)^2 \frac{D}{2} \cos \beta - \left(\frac{\pi n}{30} \right)^2 \frac{D}{2} \cos \beta - \\ & - g \frac{l_C}{l_B} \sin(\beta + \theta) + \left(\frac{\pi n}{30} \right)^2 \frac{D}{2} \frac{l_C}{l_B} \cos \beta = 0. \end{aligned} \quad (2.14)$$

Кут θ залежить від частоти обертання циліндра трієра і часу

$$\theta = \omega t = \frac{2\pi n}{60} t = \frac{\pi n}{30} t :$$

$$\begin{aligned} & \left[\frac{fl_C (f_t + fl_C)}{l_B} + \frac{l_C^2}{l_B} + \frac{l^2 + b^2 + 5l_C^2}{5l_B} + \frac{f (f_t + fl_C) (l^2 + b^2 + 5l_C^2)}{5l_B l_C} - l_C \right] \ddot{\beta} + \\ & + (f_t + fl_C) \dot{\beta}^2 + \frac{\pi n}{15} (f_t + fl_C) \dot{\beta} + g \sin\left(\beta + \frac{\pi n}{30} t\right) - \frac{f_t + fl_C}{l_C} g \cos\left(\beta + \frac{\pi n}{30} t\right) - \\ & - \frac{f (f_t + fl_C) + l_C}{l_B} g \sin\left(\beta + \frac{\pi n}{30} t\right) + \frac{f (f_t + fl_C) - l_B}{l_B} \left(\frac{\pi n}{30} \right)^2 \frac{D}{2} \cos \beta - \\ & - \frac{f_t + fl_C}{l_C} \left(\frac{\pi n}{30} \right)^2 \frac{D}{2} \sin \beta + \left(\frac{\pi n}{30} \right)^2 \frac{D}{2} \frac{l_C}{l_B} \cos \beta = 0. \end{aligned} \quad (2.15)$$

Початок руху приймаємо при куті $\theta(0) = -\frac{\pi}{2}$. Початковими умовами є

$$\begin{cases} \beta(0) = 0, \\ \dot{\beta}(0) = \frac{\pi n}{30}. \end{cases} \quad (2.16)$$

Вирішуючи рівняння (2.15) спільно з початковими умовами (2.16) і приймаючи фізико-механічні властивості насіння ($l_c = 0,005$ м, $f = 0,6$, $f_t = 0,0005$ м, $l_B = 0,008$ м, $l = 0,01$ м, $b = 0,002$ м) в програмному пакеті Wolfram Cloud отримуємо залежності кутів $\beta(t)$ і $\theta(t)$, які приведені на рис. 2.3–2.4 для різних значень частоти обертання циліндра n і його діаметра D .

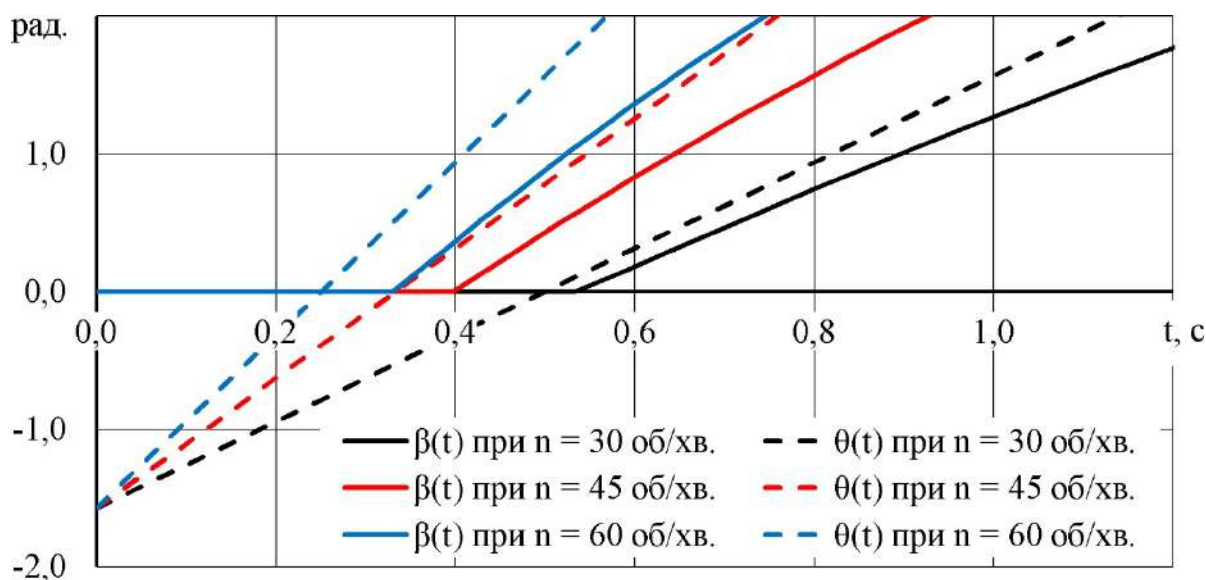


Рисунок 2.3 – Залежність кута $\beta(t)$ і $\theta(t)$ при $D = 0,4$ м

На рисунку 2.3 зображено графік залежності кутів β та θ від часу при різних значеннях частоти обертання циліндра при сталому діаметрі $D = 0,4$ м. З графіку видно, що кути β і θ зростають зі збільшенням часу руху компонента насінневої суміші. Зменшення частоти обертання циліндра впливає на час руху t . При меншому значенні частоти обертання циліндра, а саме при 30 об/хв., до значення кута $\beta(t) = 0$ рад, компонент суміші доходить за 0,53 с від початку руху, у той час як при більшому значенні частоти обертання циліндра, до значення кута $\beta(t) = 0$ рад компонент насінневого матеріалу доходить за 0,32 с. До значення кута $\theta(t) = 0$ рад

компонент суміші дійде за 0,24 с при максимальному значенні частоти обертання циліндра, а саме при 60 об/хв., а при 30 об/хв. до значення кута $\theta(t) = 0$ рад компонент суміші дійде за 0,49 с.

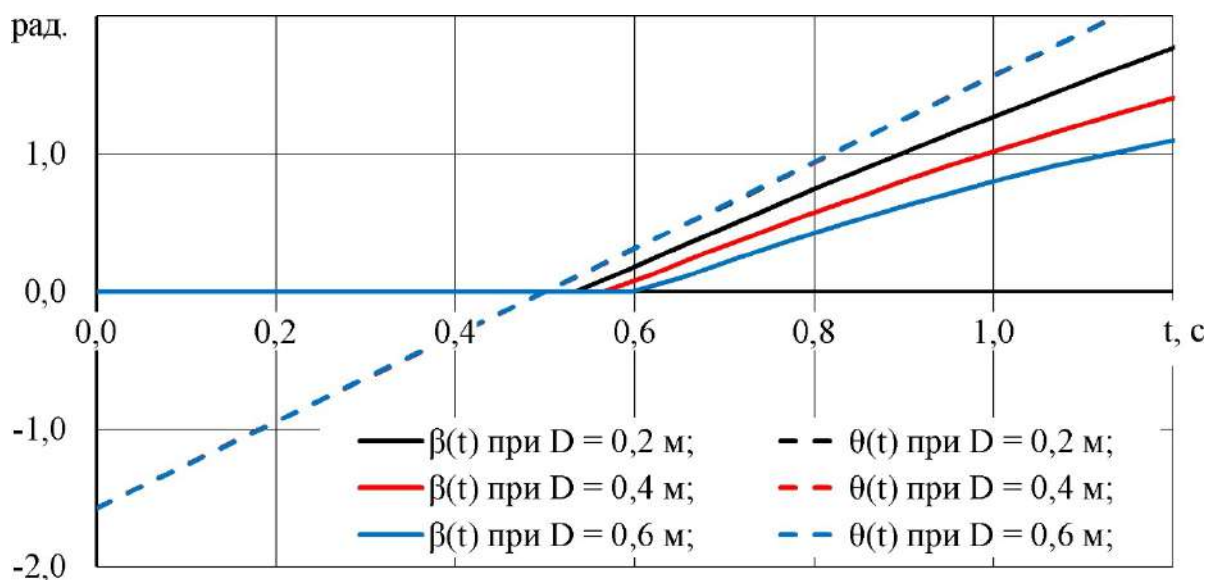


Рисунок 2.4 – Залежність кута $\beta(t)$ і $\theta(t)$ при $n = 30$ об/хв.

На рисунку 2.4 зображено графік залежності кутів β та θ від часу при різних значеннях діаметра циліндра при сталому значенні частоти обертання циліндра $n = 30$ об/хв. З графіку видно, що зі збільшенням часу значення кутів β і θ зростають. Зменшення частоти обертання циліндра впливає на час руху t . Збільшення діаметру циліндра D .

Перерахувавши залежність $\beta(t)$ через кут обертання циліндра трієра з використанням виразу $t = \frac{30 \cdot \theta}{\pi n}$ отримуємо відповідні залежності $\beta(\theta)$, які приведені на рис. 2.5-2.6 для різних значень частоти обертання циліндра n і його діаметра D .

Аналіз рис. 2.5-2.6 дає змогу визначити мінімальний кут обертання циліндра трієра при якому починається обертатися компонент насінневої суміші відносно центра мас:

$$\theta_{\min}(n = 30 \text{ об/хв.}, D = 0,2 \text{ м}) = 0,12 \text{ рад.} = 6,9^\circ;$$

$$\theta_{\min}(n = 45 \text{ об/хв.}, D = 0,2 \text{ м}) = 0,33 \text{ рад.} = 18,9^\circ;$$

$$\theta_{\min}(n = 60 \text{ об/хв.}, D = 0,2 \text{ м}) = 0,52 \text{ рад.} = 29,8^\circ;$$

$$\theta_{\min}(n = 30 \text{ об/хв.}, D = 0,4 \text{ м}) = 0,18 \text{ рад.} = 10,3^\circ;$$

$$\theta_{\min}(n = 30 \text{ об/хв.}, D = 0,6 \text{ м}) = 0,29 \text{ рад.} = 16,6^\circ.$$

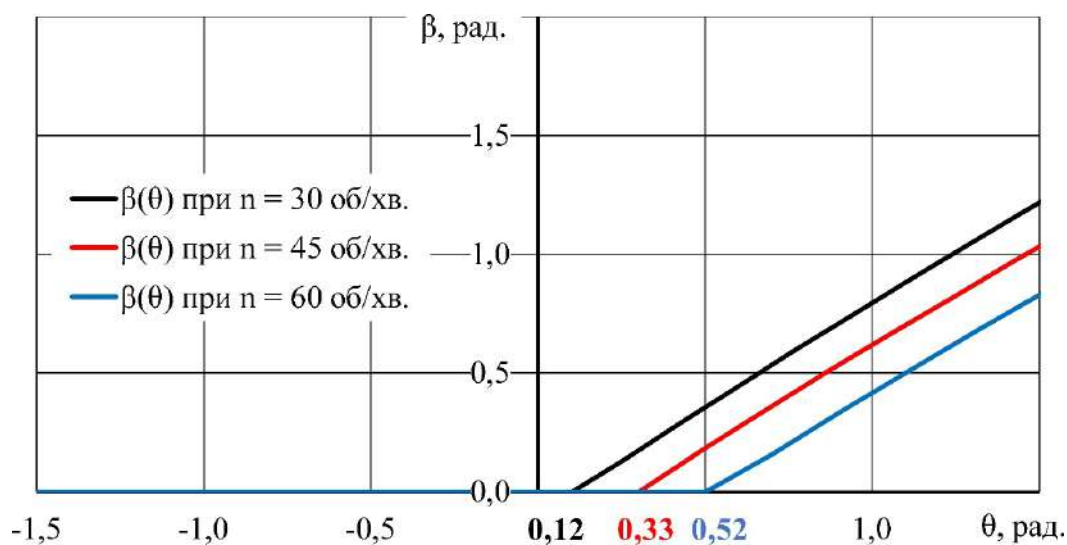


Рисунок 2.5 – Залежність кута $\beta(\theta)$ при $D = 0,2$ м

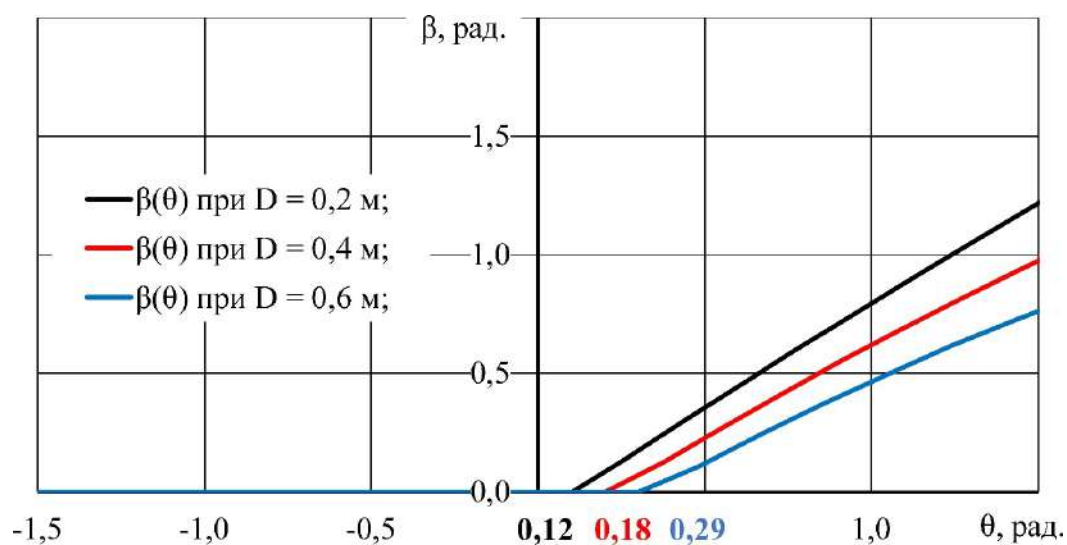


Рисунок 2.6 – Залежність кута $\beta(\theta)$ при $n = 30$ об/хв.

Через те, що розглянуто рух однієї частинки компонента насінневої суміші, не враховано взаємодію їх між собою. Тому отримані дані потребують перевірки, яку будемо проводити шляхом чисельного моделювання методом дискретних елементів.

2.2 Методика чисельного моделювання процесу сепарації насіннєвого матеріалу дрібнонасіннєвих культур на селекційно-насінницькому трієрі

Задачею чисельного моделювання є визначення теоретичних закономірностей зміни технологічних параметрів процесу сепарації насіннєвого матеріалу дрібнонасіннєвих культур від конструктивно-режимних параметрів селекційно-насінницького трієра. Дослідженнями [116, 117, 118, 119, 120] було запропоновано вирішення схожих задач за допомогою методу кінцевих елементів, який був реалізований у програмному пакеті Simcenter Star-CCM+. Процес моделювання може бути здійснений з використанням різних підходів, а в даний час класифікується наступними методами [121]: емпіричні, аналіз структури потоків матеріалу з використанням функції розподілення часу перебування частинок, механіка суцільних середовищ, ентропійно-інформаційні та статистичні методи.

Наступні типові математичні моделі структури потоку матеріалу набули значного поширення серед дослідників: моделі ідеального витиснення та ідеального змішування, дифузійна модель, а також комбінована модель [122, 123].

На початковому етапі стратегії комплексного системного аналізу фізико-механічної системи передбачається проведення якісного аналізу. У цьому процесі для сепарації виділяються два рівні ієрархії фізико-механічних ефектів і явищ: мікрорівень, що включає сукупність фізико-механічних явищ в елементарному об'ємі, та макрорівень, що описує сукупність фізико-механічних явищ в об'ємі всього апарату. Таким чином, необхідно провести чисельне моделювання процесу переміщення дрібнонасіннєвого насіннєвого матеріалу під дією циліндра, що обертається, селекційно-насінницького трієра та визначити його фізико-математичну модель.

При використанні методу кінцевих елементів для моделювання процесу спочатку встановлюються початкові положення та швидкості насінин і повітряного потоку. Застосовуючи задані фізичні закони контактної взаємодії, обчислюються сили, що діють на кожну насініну в кожен проміжок часу. Для кожної насініни розраховується результуюча сила, і вирішується задача Коші на обраному проміжку

часу. Результатом цього є початкові дані для наступного кроку моделювання. В якості фізичних моделей для чисельного моделювання використовуються наступні: модель турбулентності розділеного потоку з к-ε моделлю, поле сили тяжіння, модель реального газу Ван-дер-Ваальса, модель дискретних елементів, модель багатофазної взаємодії [124, 125, 126]. Метод дискретних елементів ґрунтується на законах збереження імпульсу та моменту імпульсу для Лагранжевих моделей багатофазового середовища. Проте для побудови фізико-математичної моделі потрібно припустити, що насінини можуть бути представлені як однакові еліпсоїди з визначеною щільністю та ефективним діаметром.

В якості моделі насіння були прийняті насінини гірчиці, фізико-механічні властивості яких були наступними: коефіцієнт Пуассона – 0,5; модуль Юнга – 0,2 МПа; щільність – 700 кг/м³; коефіцієнт тертя спокою – 0,8; нормальний коефіцієнт відновлення – 0,5; дотичний коефіцієнт відновлення – 0,5; коефіцієнт опору кочення – 0,3. Модель насінини гірчиці є куля (рис. 2.7). При цьому ефективний діаметр насіння підпорядковується нормальному розподілу і характеризується густиною ймовірності (рис. 2.8):

$$f(d_g, \bar{d}_g, \sigma_g) = \frac{1}{\sigma_g \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(d_g - \bar{d}_g)^2}{2\sigma_g^2}\right), \quad (2.17)$$

де $\bar{d}_g = 0,002$ м – середнє значення ефективного діаметра насіння, м;

$\sigma_g = 0,001$ м – середнє квадратичне відхилення ефективного діаметра насіння, м.

При цьому насіння можуть мати ефективний діаметр, який знаходиться в діапазоні $d_g \in [d_{g\min}; d_{g\max}]$, де $d_{g\min} = 0,001$ м – мінімальне значення ефективного діаметра насінини, м; $d_{g\max} = 0,003$ м – максимальне значення ефективного діаметра насінини, м.

Насіннева суміш представлялась у вигляді двох компонентів: насіння основної культури і домішки.

В якості моделі домішок у насіннєвій суміші були прийняті наступні фізико-механічні властивості: коефіцієнт Пуассона – 0,5; модуль Юнга – 0,2 МПа; щільність – 700 кг/м³; коефіцієнт тертя спокою – 0,8; нормальний коефіцієнт відновлення – 0,5; дотичний коефіцієнт відновлення – 0,5; коефіцієнт опору кочення – 0,3. Модель домішок приведена на рис. 1, б. При цьому ефективний діаметр домішок підпорядковується нормальному розподілу і характеризується густиною ймовірності (рис. 2.8):

$$f(d_i, \bar{d}_i, \sigma_i) = \frac{1}{\sigma_i \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(d_i - \bar{d}_i)^2}{2\sigma_i^2}\right), \quad (2.18)$$

де $\bar{d}_i = 0,003$ м – середнє значення ефективного діаметра домішки, м;

$\sigma_g = 0,001$ м – середнє квадратичне відхилення ефективного діаметра домішки, м.



Рисунок 2.7 – Моделі насіння (а) і домішок (б)

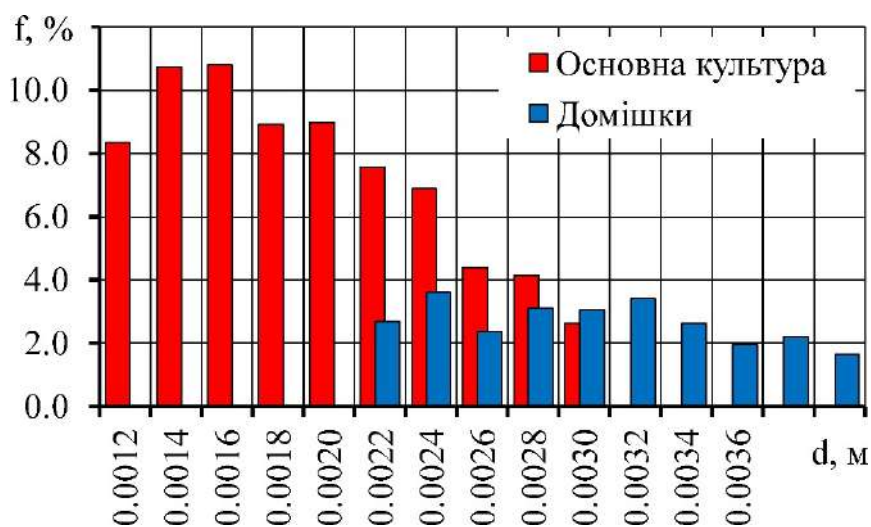


Рисунок 2.8 – Розподіл кількості насінин основної культури і домішок за їх ефективним діаметром

При цьому насіння можуть мати ефективний діаметр, який знаходиться в діапазоні $d_g \in [d_{g\min}; d_{g\max}]$, де $d_{g\min} = 0,002$ м – мінімальне значення ефективного діаметра домішки, м; $d_{g\max} = 0,004$ м – максимальне значення ефективного діаметра домішки, м.

Властивості середовища були наступні: середовище – повітря; динамічна в'язкість – $1,85508 \cdot 10^{-5}$ Па·с; турбулентне число Прандтля – 0,9; прискорення вільного падіння – $9,8$ м/с²; температура – 293 К; тиск – 101325 Па.

Сітка моделі – це область, в якій відбувається процес сепарації насіннєвого матеріалу. Вона обмежена поверхнею, завдяки якій насіннєвий матеріал не буде її перетинати. Сітка моделі представлена у вигляді багатогранних комірок різного розміру. Важливим є те, що розмір комірки впливає на якість розрахунку (чим менша чарунка, тим вище якість) і відповідно, впливає на час розрахунку. В результаті попереднього моделювання встановлено, що раціональний розмір комірки сітки моделювання складає 0,0012 м (рис. 2.9).

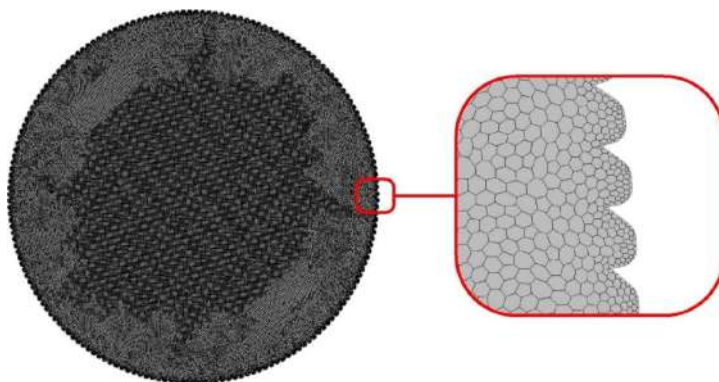


Рисунок 2.9 – Сітка моделі чисельного моделювання в програмному пакеті Simcenter Star-CCM+

Чисельне моделювання процесу розділення насіннєвого матеріалу дрібнонасіннєвих культур за довжиною було проведено наступним чином.

Розрахункова схема селекційно-насінницького трієра представлена на рис. 2.10.

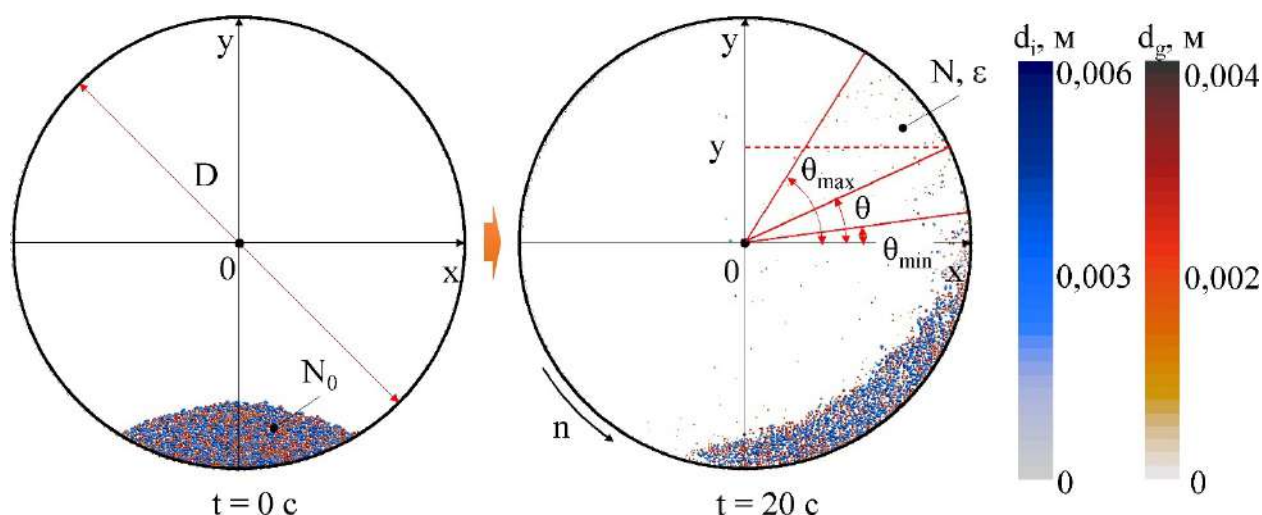


Рисунок 2.10 – Розрахункова схема селекційно-насінницького трієра для чисельного моделювання в програмному пакеті Simcenter Star-CCM+

На рисунку 2.10 представлено два плоских зображення циліндра селекційно-насінницького трієра з насіннєвим матеріалом у поперечному розрізі в системі координат xOy : з лівої сторони циліндр у стані спокою, з правої сторони – під час обертання за годинниковою стрілкою упродовж 20 секунд. Діаметр циліндра D постійний. Важливими критеріями було визначення максимального θ_{\max} та мінімального θ_{\min} кутів повороту на моментах сходу першого компоненту насіннєвого матеріалу та останнього. Кількість насінин N_0 у проміжку між θ_{\max} та θ_{\min} є опосередкованим показником продуктивності трієра, оскільки під час обертання циліндра насіннєвий матеріал піднімається за траєкторією руху. Під час обертання циліндра трієра довгі домішки випадають з чарунок не доходючи до області θ_{\min} та θ_{\max} , але має місце поняття випадковості, при якому за випадкових умов домішка доходить до області між θ_{\min} та θ_{\max} . Якість процесу сепарації насіннєвого матеріалу залежить від кількості домішок, що потрапили до проміжку між θ_{\min} та θ_{\max} .

Факторами для чисельного моделювання є діаметр циліндра трієрного сепаратора D , частота його обертання n і кількість насінин в насіннєвій суміші N_0 в початковий момент часу. Рівні варіювання факторами приведено в табл. 2.1. Було

здійснено повне факторне моделювання, в рамках якого було проведено $5^3 = 125$ дослідів.

Таблиця 2.1 – Рівні варіювання факторами чисельного моделювання

Рівень	Фактор		
	Діаметр циліндра трієра D, м (x_1)	Частота обертання циліндра трієра n, об/хв. (x_2)	Кількість насінин і домішок в насінневій суміші N_0 , шт. (x_3)
-1,0	0,2	30,0	1000
-0,5	0,3	37,5	2000
0	0,4	45,0	3000
+0,5	0,5	52,5	4000
+1,0	0,6	60,0	5000

В момент виходу насінини з чарунки фіксувалося значення кута θ полярної системи координат і координати у декартової системи координат згідно рис. 2.10. Приклад розподілу висоти розміщення компонентів насінневої суміші в залежності від їх ефективного діаметра приведено на рис. 2.11.

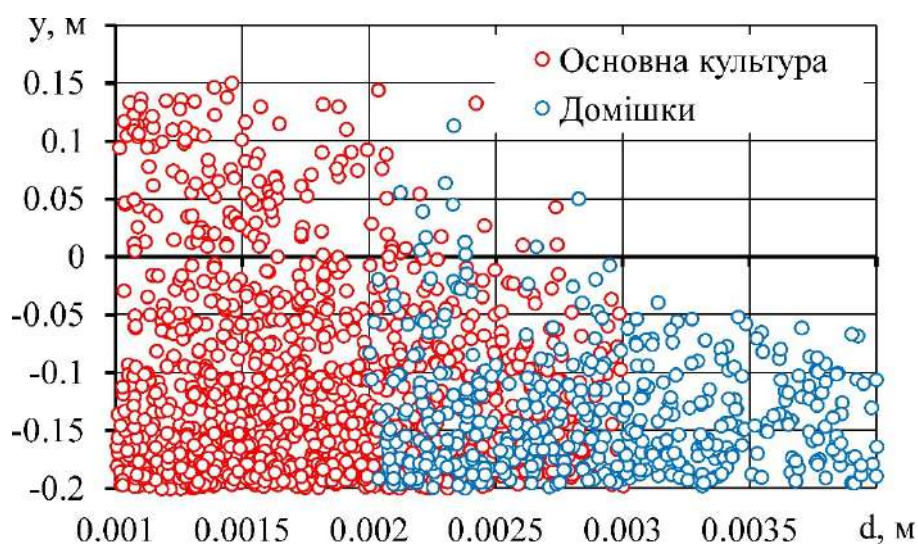


Рисунок 2.11 – Розподіл висоти у розміщення компонентів насінневої суміші в залежності від їх ефективного діаметра d при $D = 0,4$ м, $n = 45$ об/хв, $N_0 = 2000$ шт.

З переліку значень кута θ виходу насінини з чарунки визначалися мінімальне θ_{\min} і максимальне θ_{\max} значення.

В якості критерію продуктивності було обрано кількість всіх компонентів насінневої суміші N , які знаходилися в межах мінімального θ_{\min} і максимального θ_{\max} кутів повороту циліндра трієрного сепаратора.

В якості критерію оцінки якості процесу сепарації було прийнято відносний вміст домішок ε в насінневій суміші, яка знаходилася в межах мінімального θ_{\min} і максимального θ_{\max} кутів повороту циліндра трієрного сепаратора.

В результаті обробки даних в програмному пакеті Wolfram Cloud необхідно встановити залежності вищезазначених критеріїв процесу сепарації від факторів досліджень у вигляді рівнянь регресії другого порядку.

Статистична обробка отриманих даних в програмному пакеті Wolfram Cloud полягала у визначенні критерію Стюдента для кожного коефіцієнта рівняння регресії і порівняння його із табличним значенням. Якщо розраховане значення менше за табличне, то коефіцієнт рівняння регресії є незначущим і його можна не враховувати.

Отримане рівняння регресії перевірялося на адекватність за допомогою критерію Фішера і коефіцієнта кореляції.

2.3 Результати чисельного моделювання процесу сепарації насінневого матеріалу дрібнонасінневих культур на селекційно-насінницькому трієрі

В результаті чисельного моделювання процесу сепарації насінневого матеріалу дрібнонасінневих культур на селекційно-насінницькому трієрі (додаток А) отримано візуалізацію, яка приведена на рис. 2.12–2.14.

На рис. 2.12 представлено візуалізацію процесу сепарації насінневого матеріалу дрібнонасінневих культур на селекційно-насінницькому трієрі в залежності від кількості насінин і домішок в насінневій суміші N_0 . На рисунку показані три плоских зображення циліндрів трієра у поперечному розрізі з постійним діаметром $D = 0,4$ м, з постійною частотою обертання циліндра $n = 45$

об/хв. У першому випадку кількість насінин $N_0 = 1000$ шт, у другому $N_0 = 3000$ шт, у третьому випадку $N_0 = 5000$ шт.

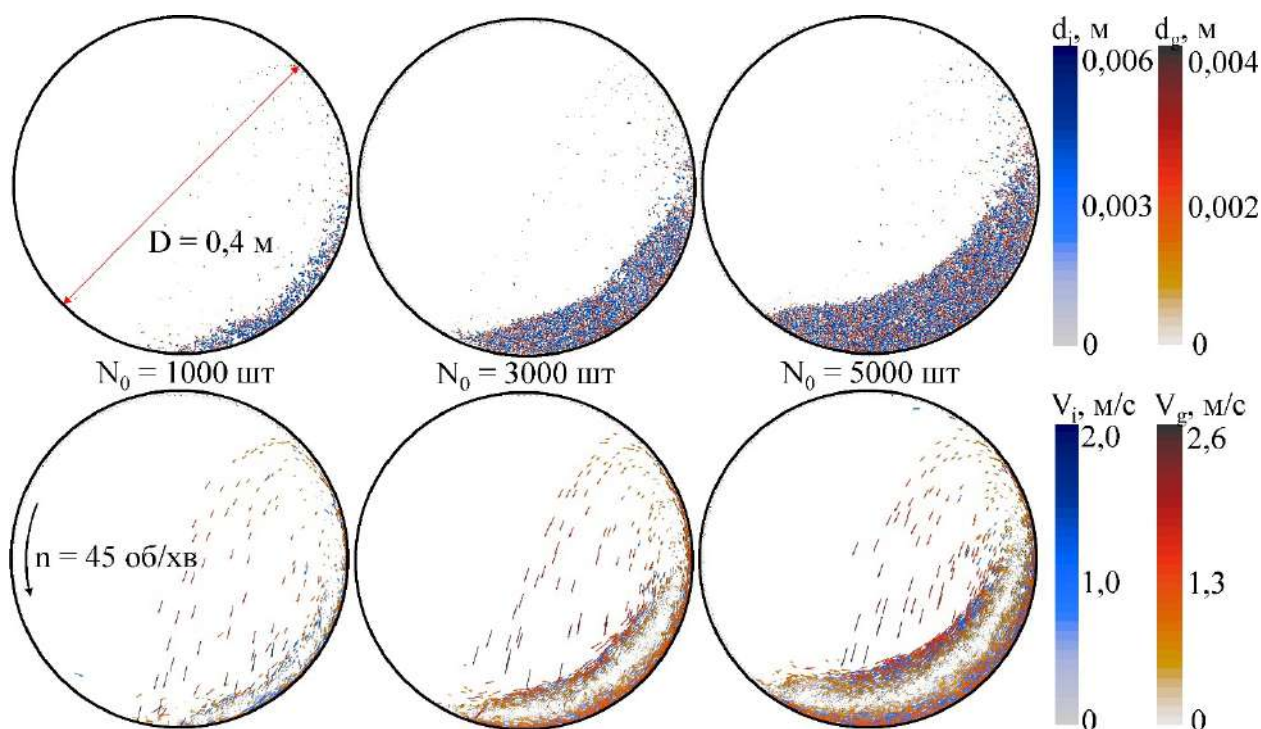


Рисунок 2.12 – Візуалізація процесу сепарації насінневого матеріалу дрібнонасінневих культур на селекційно-насінницькому трієрі в залежності від кількості насінин і домішок в насінневій суміші N_0

Під час обертання циліндра у кожному випадку за траєкторією руху циліндра насінневий матеріал піднімається на певну висоту. При найменшій кількості насіння (при $N_0 = 1000$ шт) видно, що більша частина (25,3 %) насінневого матеріалу піднімається за напрямком обертання циліндра з початкової точки до кута θ , при $N_0 = 3000$ шт піднімається більша кількість насінневого матеріалу – 32,2 % від загальної кількості, при $N_0 = 5000$ шт – ще більша (36,6 %). З рисунку видно, що зі збільшенням кількості насінневого матеріалу, утворюється так званий, «мертвий шар» матеріалу, який позначений на рисунках білими областями у вигляді дуги. Ця область називається мертвою через відсутність перемішування шарів насінневого матеріалу, оскільки постійна частота та діаметр циліндра не пристосовані для сепарації великої кількості насінневого матеріалу. Вилучення «мертвого шару» при

більшій кількості насінневого матеріалу можна досягти за рахунок збільшення частоти обертання циліндра трієра або збільшення діаметру циліндра.

На рис. 2.13 представлена візуалізація процесу сепарації насінневого матеріалу дрібнонасінневих культур на селекційно-насінницькому трієрі в залежності від частоти обертання циліндра трієра n . На рисунку 2.13 показані три плоскі зображення циліндрів трієра у поперечному розрізі з постійним діаметром $D = 0,4$ м, постійною кількістю насінневого матеріалу $N_0 = 3000$ шт, та різною частотою обертання циліндрів $n = 30$ об/хв, $n = 45$ об/хв, $n = 60$ об/хв. У випадку з найменшою частотою обертання $n = 30$ об/хв, більша частина насінневого матеріалу не доходить до області θ_{\min} та θ_{\max} , а значить обрана частота не ефективна.

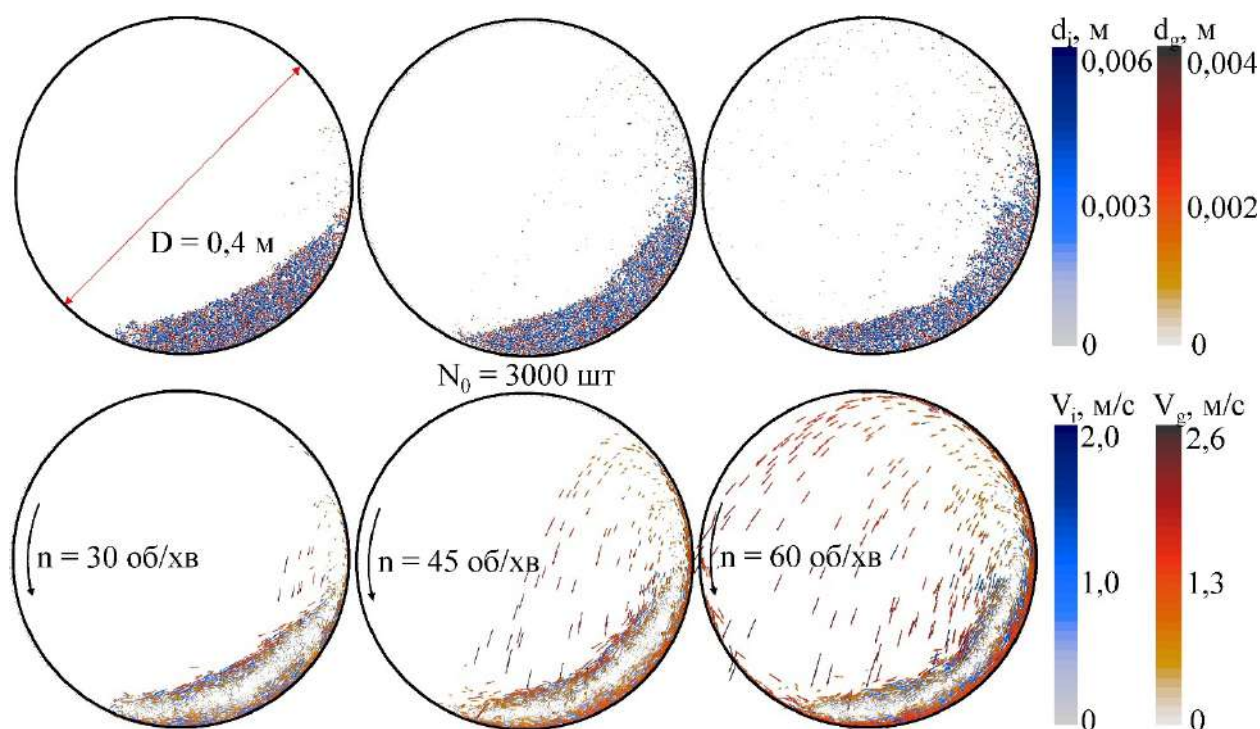


Рисунок 2.13 – Візуалізація процесу сепарації насінневого матеріалу дрібнонасінневих культур на селекційно-насінницькому трієрі в залежності від частоти обертання циліндра трієра n

Також з рисунку видно «мертвий шар» насінневого матеріалу, кількість якого можна зменшити за рахунок збільшення частоти обертання циліндра. За частоти обертання циліндра $n = 45$ об/хв. видно, що насінневий матеріал доходить до області θ_{\min} та θ_{\max} , але в такому випадку також присутній «мертвий шар». У випадку з

частотою обертання циліндра $n = 60$ об/хв., насіннєвий матеріал перелітає область θ_{\min} та θ_{\max} , але при цьому зменшується мертвий шар. Найбільш доцільною є середня частота обертання циліндра, а саме $n = 45$ об/хв.

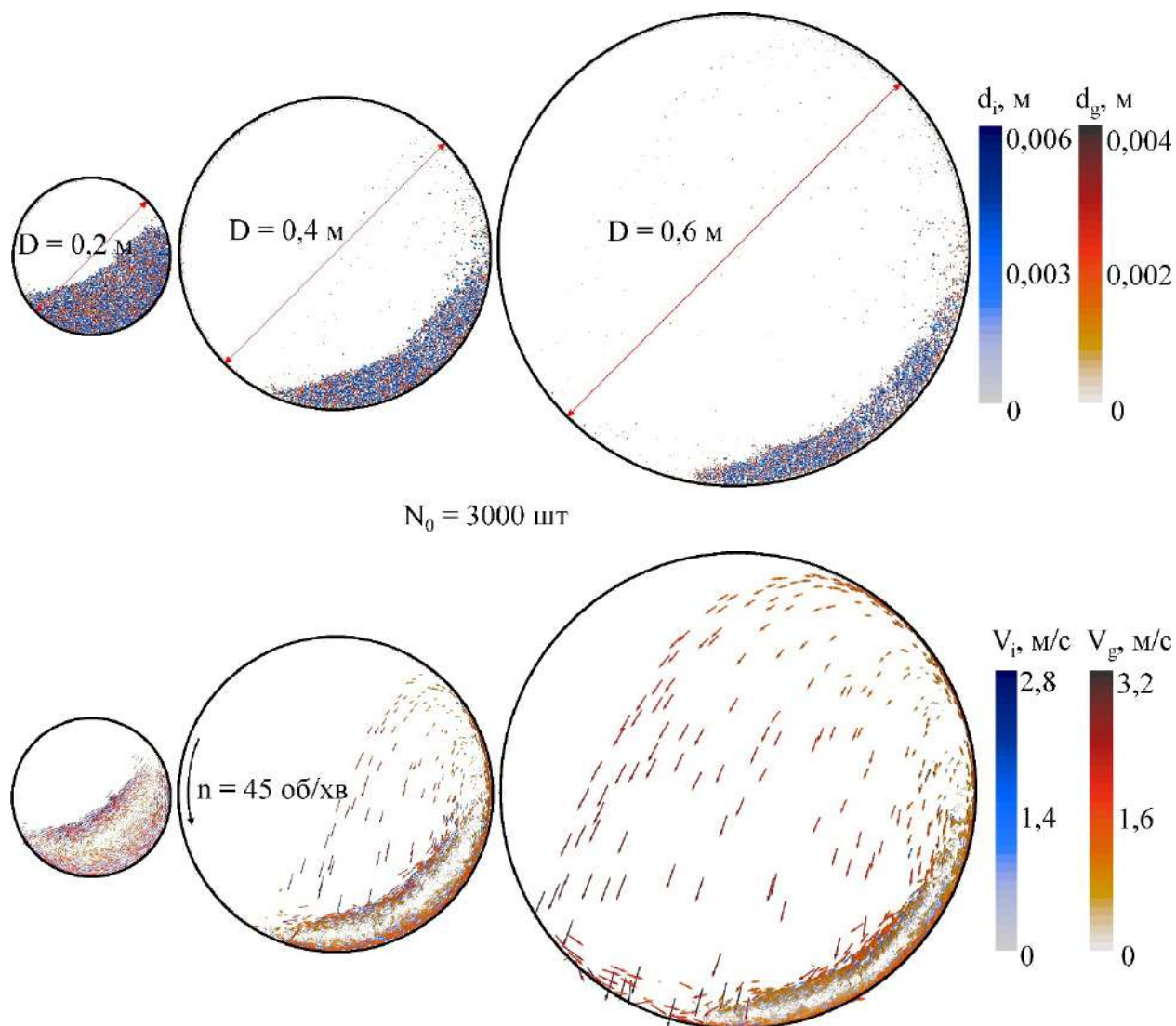


Рисунок 2.14 – Візуалізація процесу сепарації насіннєвого матеріалу дрібнонасіннєвих культур на селекційно-насінницькому трієрі в залежності від діаметра циліндра трієра D

На рис. 2.14 представлено візуалізацію процесу сепарації насіннєвого матеріалу дрібнонасіннєвих культур на селекційно-насінницькому трієрі в залежності від діаметра циліндра трієра D . На рисунку 8 показані три плоскі зображення циліндрів трієра у поперечному розрізі з постійною кількістю насіннєвого матеріалу $N_0 = 3000$ шт, постійною частотою обертання $n = 45$ об/хв. та

різними діаметрами циліндра, що становлять $D = 0,2$ м, $D = 0,4$ м, $D = 0,6$ м. За найменшого діаметру циліндра насіннєвий матеріал заповнює внутрішню область циліндра практично наполовину; при обертанні циліндра лише невелика кількість насіннєвого матеріалу піднімається до області між θ_{\max} та θ_{\min} , в той час уся інша маса утворює «мертвий шар». Найменший діаметр циліндра використовувати в подальших дослідженнях недоцільно, оскільки ефективність сепарації в такому випадку буде мінімальною.

У випадку середнього діаметру під час обертання циліндра насіннєвий матеріал піднімається до області між θ_{\min} та θ_{\max} . У випадку з найбільшим діаметром $D = 0,6$ м під час обертання циліндра більша частина насіннєвого матеріалу перелітає область між θ_{\min} та θ_{\max} , але саме в даному випадку спостерігається найменший «мертвий шар», на відміну від перших двох випадків. З рисунку видно, що найдоцільніше в подальших дослідженнях використовувати циліндр з діаметром $D = 0,4$ м.

Обробка отриманих даних (додаток А) в програмному пакеті Wolfram Cloud дозволила отримати рівняння регресії другого порядку (додаток Б), яке показує залежність значень мінімального θ_{\min} і максимального θ_{\max} значень кутів виходу насіння з чарунки циліндра трієра від факторів досліджень в закодованому вигляді:

$$\begin{aligned} \theta_{\min} = & 0,311838 - 0,0758691 x_1 - 0,0252283 x_1^2 + 0,246916 x_2 - \\ & - 0,00964664 x_1 x_2 + 0,0125726 x_2^2 + 0,104465 x_3 - \\ & - 0,00984237 x_1 x_3 + 0,081428 x_2 x_3 + 0,0366488 x_3^2, \end{aligned} \quad (2.19)$$

$$\begin{aligned} \theta_{\max} = & 0,989517 + 0,277431 x_1 - 0,0739117 x_1^2 + 0,499129 x_2 + \\ & + 0,0953195 x_1 x_2 - 0,0359794 x_2^2 - 0,00436025 x_3 + \\ & + 0,00296865 x_1 x_3 - 0,00305847 x_2 x_3 - 0,0160532 x_3^2. \end{aligned} \quad (2.20)$$

Статистична обробка рівнянь (2.19) і (2.20) приведені в таблицях 2.2 і 2.3 відповідно.

Порівнюючи розрахований критерій Стьюдента із табличним $t_{0,05}(125) = 1,98$ проведемо відхилення незначущих коефіцієнтів регресії. В результаті перетворимо рівняння (2.19) і (2.20):

$$\theta_{\min} = 0,311838 - 0,0758691 x_1 - 0,0252283 x_1^2 + 0,246916 x_2 + 0,104465 x_3 + 0,081428 x_2 x_3 + 0,0366488 x_3^2, \quad (2.21)$$

$$\theta_{\max} = 0,989517 + 0,277431 x_1 - 0,073912 x_1^2 + 0,499129 x_2 + 0,09532 x_1 x_2. \quad (2.22)$$

Таблиця 2.2 – Результати статистичної обробки рівняння (2.19)

Коефіцієнт	Значення	Помилка	Критерій Стьюдента	Ймовірність
a ₀₀	0,311838	0,00917538	33,9864	4,14411·10 ⁻⁴³
a ₁₀	-0,0758691	0,0046433	-16,3395	1,0548·10 ⁻²⁴
a ₂₀	0,246916	0,00536162	46,0524	2,41186·10 ⁻⁵¹
a ₃₀	0,104465	0,00536162	19,4839	7,70832·10 ⁻²⁹
a ₁₂	-0,00964664	0,00656662	-1,46904	0,146645
a ₁₃	-0,00984237	0,00656662	-1,49885	0,138754
a ₂₃	0,081428	0,00758248	10,739	4,843·10 ⁻¹⁶
a ₁₁	-0,0252283	0,00804243	-3,1369	0,00256524
a ₂₂	0,0125726	0,00906279	1,38727	0,170097
a ₃₃	0,0366488	0,00906279	4,04388	0,000141885

Таблиця 2.3 – Результати статистичної обробки рівняння (2.20)

Коефіцієнт	Значення	Помилка	Критерій Стьюдента	Ймовірність
a ₀₀	0,989517	0,0229487	43,1186	1,52231·10 ⁻⁴⁹
a ₁₀	0,277431	0,0116135	23,8887	6,77808·10 ⁻³⁴
a ₂₀	0,499129	0,0134101	37,2205	1,49665·10 ⁻⁴⁵
a ₃₀	-0,00436025	0,0134101	-0,325148	0,746114
a ₁₂	0,0953195	0,0164239	5,80371	2,10038·10 ⁻⁷
a ₁₃	0,00296865	0,0164239	0,180752	0,857125
a ₂₃	-0,00305847	0,0189647	-0,161272	0,872379
a ₁₁	-0,0739117	0,0201151	-3,67444	0,000484351
a ₂₂	-0,0359794	0,0226671	-1,58729	0,1173
a ₃₃	-0,0160532	0,0226671	-0,708216	0,481343

Підставляючи в рівняння (2.21)–(2.22) замість x_1 – x_3 вирази для факторів досліджень в явному вигляді отримуємо залежність значень мінімального θ_{\min} і максимального θ_{\max} значень кутів виходу насіння з чарунки циліндра трієра від факторів досліджень в розкодованому вигляді:

$$\theta_{\min} = -0,0858955 + 0,12522 D - 0,630707 D^2 + 0,00831824 n - 0,000124883 N_0 + 2,71427 \cdot 10^{-6} n N_0 + 9,1622 \cdot 10^{-9} N_0^2, \quad (2.23)$$

$$\theta_{\max} = -0,786462 + 1,43559 D - 1,84779 D^2 + 0,020566 n + 0,0317732 D n. \quad (2.24)$$

Графічна інтерпретація залежностей (2.23)–(2.24) представлена на рис. 2.15–2.17.

На рисунку 2.15 показана залежність значень мінімального θ_{\min} і максимального θ_{\max} кутів виходу насіння з чарунки циліндра трієра від діаметра циліндра трієра D та частоти обертання циліндра трієра n . Помаранчевою площиною виділена залежність значення максимального кута виходу насіння з чарунки θ_{\max} від значень частоти обертання циліндра трієра та діаметру циліндра, зеленою площиною позначено залежність значень мінімального кута виходу насіння від значень частоти обертання циліндра трієра та діаметру циліндра.

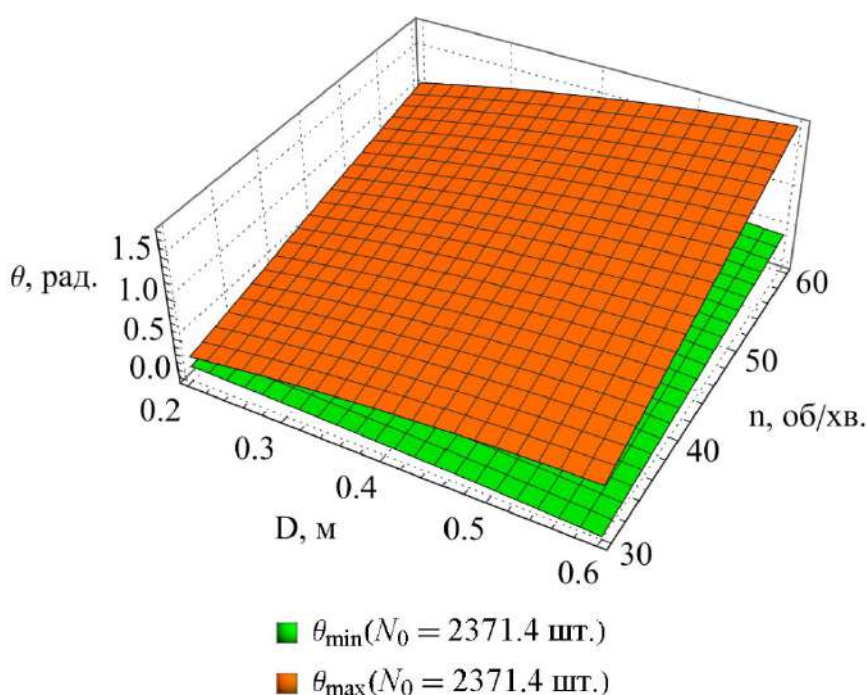


Рисунок 2.15 – Залежність значень мінімального θ_{\min} і максимального θ_{\max} значень кутів виходу насіння з чарунки циліндра трієра від діаметра циліндра трієра D та частоти обертання циліндра трієра n

З рисунку видно, що зі збільшенням частоти обертання циліндра та збільшенням його діаметру зростають значення кутів виходу насіння з чарунки

циліндра трієра. Максимальний кут виходу насіння спостерігається за максимальної частоти обертання циліндра, а саме $n = 60$ об/хв. та максимального діаметру $D = 0,6$ м, і становить $\theta_{\max} = 1,5$ рад. Найменше значення максимального кута виходу насіння спостерігається за мінімальної частоти обертання циліндра, а саме $n = 30$ об/хв.. та найменшого діаметру $D = 0,2$ м, і становить $\theta_{\max} = 0,3-0,4$ рад.

Мінімальний кут виходу насіння з чарунки циліндра трієра θ_{\min} також залежить від діаметра циліндра D та його частоти обертання n . З рисунку видно, що зі збільшенням частоти обертання циліндра збільшується мінімальний кут вильоту насіння θ_{\min} , який становить $0,4$ рад за частоти обертання циліндра $n = 60$ об/хв.. За мінімальної частоти обертання циліндра, а саме $n = 30$ об/хв., мінімальний кут виходу насіння θ_{\min} становить $\theta_{\min} = 0$ рад. Це пов'язано з тим, що за мінімальної частоти обертання циліндра насіннєвий матеріал практично не переміщується в циліндрі і не доходить до області θ_{\min} .

На рисунку 2.16 показана залежність значень мінімального θ_{\min} і максимального θ_{\max} кутів виходу насіння з чарунки циліндра трієра від діаметра циліндра трієра D та кількості всіх компонентів насіннєвої суміші N . Помаранчевою площиною виділена залежність значень максимального кута виходу насіння з чарунки θ_{\max} від кількості всіх компонентів насіннєвої суміші N та діаметру циліндра трієра, зеленою площиною позначено залежність значень мінімального кута виходу насіння θ_{\min} від кількості всіх компонентів насіннєвої суміші N та діаметру циліндра трієра D .

З рисунку видно, що зі зменшенням діаметра циліндра D та збільшенням кількості насіння у суміші N збільшується значення мінімального кута виходу насіння θ_{\min} . Це пояснюється тим, що за мінімального значення діаметра циліндра D , а саме $D = 0,2$ м, насіннєвий матеріал практично не переміщується або переміщується утворюючи товстий шар насіннєвого матеріалу, серед якого утворюється мертвий шар. Максимальний кут виходу насіння з чарунки θ_{\max} навпаки, зростає зі збільшенням діаметра циліндра D . Це пояснюється тим, що насіннєвий матеріал краще розподіляється на внутрішній поверхні циліндра і утворює тонкий шар, який легше переміщується при обертанні циліндра трієра.

Кількість насінневого матеріалу не впливає на максимальний кут виходу насіння з чарунки θ_{\max} при різних значеннях діаметра циліндра D .

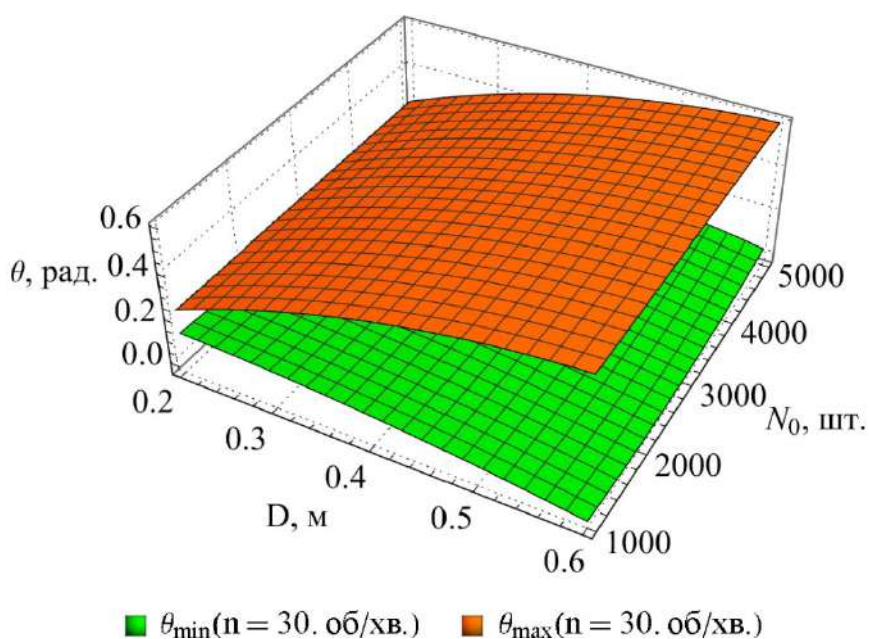


Рисунок 2.16 – Залежність значень мінімального θ_{\min} і максимального θ_{\max} значень кутів виходу насіння з чарунки циліндра трієра від діаметра циліндра трієра D та кількості насінин і домішок в насінневій суміші N_0

На рисунку 2.17 показана залежність значень мінімального θ_{\min} і максимального θ_{\max} кутів виходу насіння з чарунки циліндра трієра від частоти обертання циліндра трієра n та кількості насінин і домішок в насінневій суміші N_0 . Помаранчевою площиною виділена залежність значень максимального кута виходу насіння з чарунки θ_{\max} від частоти обертання циліндра трієра n та кількості насінин і домішок в насінневій суміші N_0 , зеленою площиною позначено залежність значень мінімального кута виходу насіння θ_{\min} від частоти обертання циліндра трієра n та кількості насінин і домішок в насінневій суміші N_0 .

З рисунку видно, що значення мінімального θ_{\min} і максимального θ_{\max} кутів виходу насіння зростають зі збільшенням частоти обертання циліндра трієра n . Значення мінімального θ_{\min} кута виходу насіння зростають зі збільшенням частоти обертання циліндра трієра n , а також ці значення залежать і від кількості насінин і домішок в насінневій суміші N_0 . З рисунку видно, що зі збільшенням кількості

насіннєвого матеріалу, зростає мінімальний θ_{\min} кут виходу насіння з чарунки. Це пояснюється тим, що за більшої частоти обертання циліндра трієра n більше насіннєвого матеріалу розподіляється по внутрішній поверхні циліндра трієра за напрямком обертання циліндра, і тим менший мертвий шар насіннєвого матеріалу утворюється.

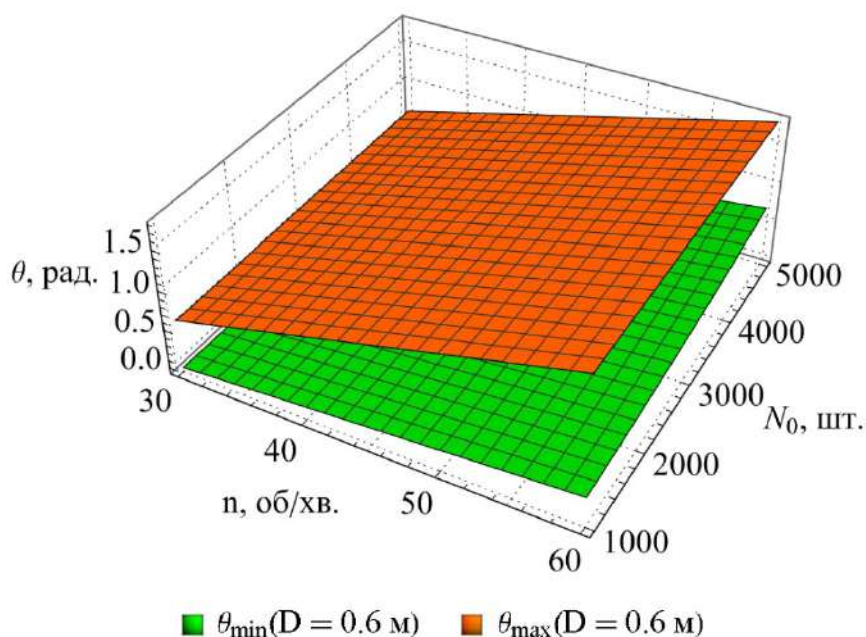


Рисунок 2.17 – Залежність значень мінімального θ_{\min} і максимального θ_{\max} значень кутів виходу насіння з чарунки циліндра трієра від частоти обертання циліндра трієра n та кількості насінин і домішок в насіннєвій суміші N_0

Максимальний кут виходу насіння з чарунки θ_{\max} також зростає зі збільшенням частоти обертання циліндра трієра n . Кількість насіннєвого матеріалу не впливає на максимальний кут виходу насіння з чарунки θ_{\max} .

Статистичний аналіз рівнянь (2.23) і (2.24) в досліджуваному діапазоні варіювання показав, що коефіцієнт кореляції Пірсона складає 0,82 і 0,85 відповідно. В свою чергу критерій Фішера складає $F_{(2,23)} = 2,27 < F_T = 2,49$ і $F_{(2,24)} = 2,17 < F_T = 2,49$ відповідно. Це підтверджує адекватність отриманих моделей.

Обробка отриманих даних (додаток А) в програмному пакеті Wolfram Cloud дозволила отримати рівняння регресії другого порядку (додаток Б), яке показує залежність значень кількості всіх компонентів насіннєвої суміші N , які знаходилися

в межах мінімального θ_{\min} і максимального θ_{\max} кутів повороту циліндру трієрного сепаратора від факторів досліджень в закодованому вигляді:

$$N = 235,731 - 47,14 x_1 + 47,74 x_1^2 + 165,44 x_2 + 59,26 x_1 x_2 + 29,8667 x_2^2 + 170,96 x_3 - 88,6 x_1 x_3 + 90,6133 x_2 x_3 - 2,20952 x_3^2. \quad (2.25)$$

Статистична обробка рівняння (2.25) приведені в таблиці 2.4.

Таблиця 2.4 – Результати статистичної обробки рівняння (2.25)

Коефіцієнт	Значення	Помилка	Критерій Стьюдента	Ймовірність
a ₀₀	235,731	12,0203	19,6112	$5,36449 \cdot 10^{-29}$
a ₁₀	-47,14	6,08299	-7,74948	$8,13362 \cdot 10^{-11}$
a ₂₀	165,44	7,02403	23,5534	$1,54678 \cdot 10^{-33}$
a ₃₀	170,96	7,02403	24,3393	$2,26924 \cdot 10^{-34}$
a ₁₂	59,26	8,60264	6,88858	$2,72815 \cdot 10^{-9}$
a ₁₃	-88,6	8,60264	-10,2992	$2,72282 \cdot 10^{-15}$
a ₂₃	90,6133	9,93347	9,12202	$3,02192 \cdot 10^{-13}$
a ₁₁	47,74	10,536	4,53111	0,000025749
a ₂₂	29,8667	11,8728	2,51556	0,0143649
a ₃₃	-2,20952	11,8728	-0,1861	0,852946

Порівнюючи розрахований критерій Стьюдента із табличним $t_{0,05}(125) = 1,98$ проведемо відхилення незначущих коефіцієнтів регресії. В результаті перетворимо рівняння (2.25):

$$N = 235,731 - 47,14 x_1 + 47,74 x_1^2 + 165,44 x_2 + 59,26 x_1 x_2 + 29,8667 x_2^2 + 170,96 x_3 - 88,6 x_1 x_3 + 90,6133 x_2 x_3. \quad (2.26)$$

Підставляючи в рівняння (2.26) замість x_1 - x_3 вирази для факторів досліджень в явному вигляді отримуємо залежність значень кількості всіх компонентів насінневої суміші N, які знаходилися в межах мінімального θ_{\min} і максимального θ_{\max} кутів повороту циліндру трієрного сепаратора від факторів досліджень в розкодованому вигляді:

$$N = 534,531 - 1414,9 D + 1193,5 D^2 - 17,88 n + 19,7533 D n + 0,132741 n^2 + 0,03816 N_0 - 0,2215 D N_0 + 0,00302044 n N_0. \quad (2.27)$$

Оптимальні значення факторів при умові максимуму кількості всіх компонентів насінневої суміші ($N = 816$ шт.) складають $D = 0,2$ м, $n = 60$ об/хв., $N_0 = 5000$ шт.

Графічна інтерпретація залежності (2.27) представлена на рис. 2.18–2.20.

На рисунку 2.18 показано залежність значень кількості всіх компонентів насінневої суміші N , які знаходилися в межах мінімального θ_{\min} і максимального θ_{\max} кутів повороту циліндру трієрного сепаратора, від діаметра циліндра трієра D та частоти обертання циліндра трієра n . З рисунку видно, що значення кількості всіх компонентів насінневої суміші N зростають зі зменшенням діаметру циліндра та збільшенням частоти обертання циліндра n . Зі збільшенням частоти обертання циліндра до чарунок частіше буде потрапляти насінневий матеріал і відповідно насінневий матеріал ефективніше буде розділятися на основну культуру і домішки. Діаметр циліндра трієра D також має значення, оскільки за більшого діаметру менша кількість насінневого матеріалу доходить до області між мінімальним θ_{\min} і максимальним θ_{\max} кутами повороту циліндру трієрного сепаратора.

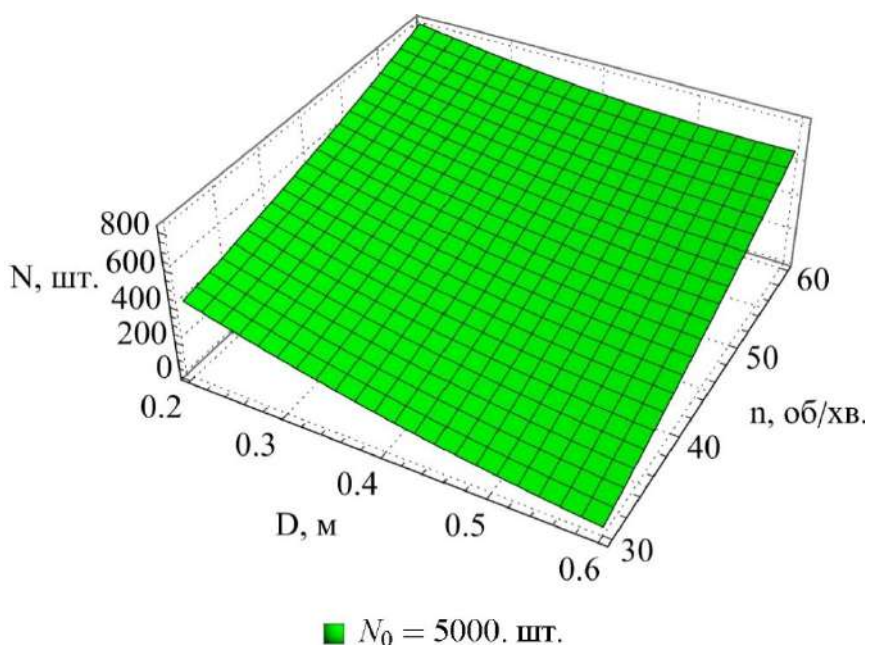


Рисунок 2.18 – Залежність значень кількості всіх компонентів насінневої суміші N , які знаходилися в межах мінімального θ_{\min} і максимального θ_{\max} кутів повороту циліндру трієрного сепаратора від діаметра циліндра трієра D та частоти обертання циліндра трієра n

На рисунку 2.19 показано залежність значень кількості всіх компонентів насінневої суміші N , які знаходилися в межах мінімального θ_{\min} і максимального θ_{\max} кутів повороту циліндру трієрного сепаратора від діаметра циліндра трієра D та кількості насінин і домішок в насінневій суміші N_0 .

З рисунку видно, що кількість всіх компонентів насінневої суміші N , які знаходилися в межах мінімального θ_{\min} і максимального θ_{\max} кутів повороту циліндру трієрного сепаратора зростає зі збільшенням загальної кількості всіх компонентів насінневої маси N_0 . Також з рисунку видно, що кількість всіх компонентів насінневої суміші N , які знаходилися в межах мінімального θ_{\min} і максимального θ_{\max} кутів повороту циліндру трієрного сепаратора зростає зі збільшенням діаметру циліндра D .

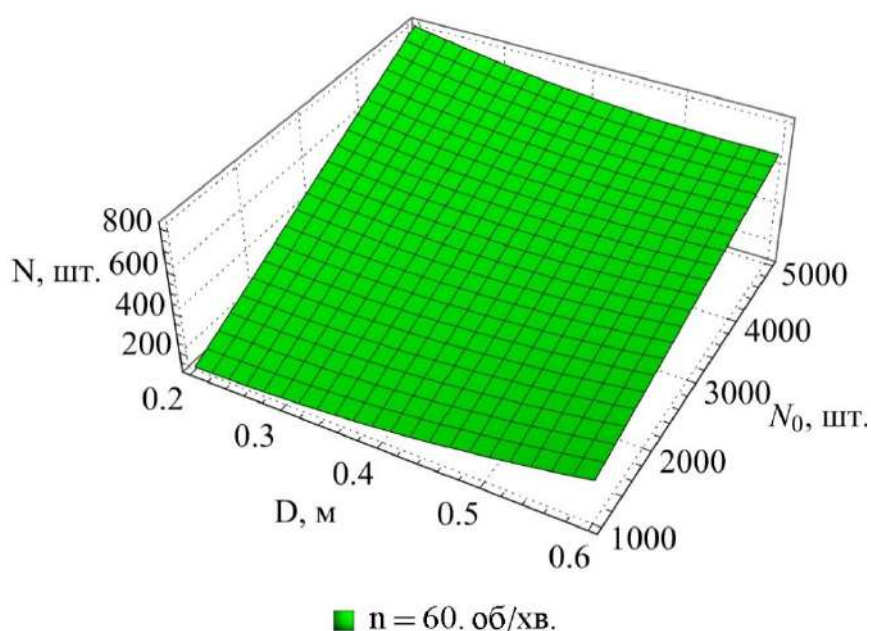


Рисунок 2.19 – Залежність значень кількості всіх компонентів насінневої суміші N , які знаходилися в межах мінімального θ_{\min} і максимального θ_{\max} кутів повороту циліндру трієрного сепаратора від діаметра циліндра трієра D та кількості насінин і домішок в насінневій суміші N_0

На рисунку 2.20 показано залежність значень кількості всіх компонентів насінневої суміші N , які знаходилися в межах мінімального θ_{\min} і максимального θ_{\max} кутів повороту циліндру трієрного сепаратора від частоти обертання циліндра трієра

n та кількості насінин і домішок в насіннєвій суміші N_0 . З рисунку видно, що частота обертання циліндра n за мінімального значення N_0 ($N_0 = 1000$ шт) практично не впливає на значення кількості всіх компонентів насіннєвої суміші N , які знаходилися в межах мінімального θ_{\min} і максимального θ_{\max} кутів повороту циліндру трієрного сепаратора. Зі збільшенням значень N_0 та частоти обертання циліндра n , зростають значення кількості насіннєвого матеріалу N . Кількість насінин та домішок в насіннєвому матеріалі N_0 впливає на кількість насіннєвого матеріалу N , що знаходилися в межах мінімального θ_{\min} і максимального θ_{\max} : що більша кількість N_0 , тим більша кількість матеріалу доходила до необхідних меж.

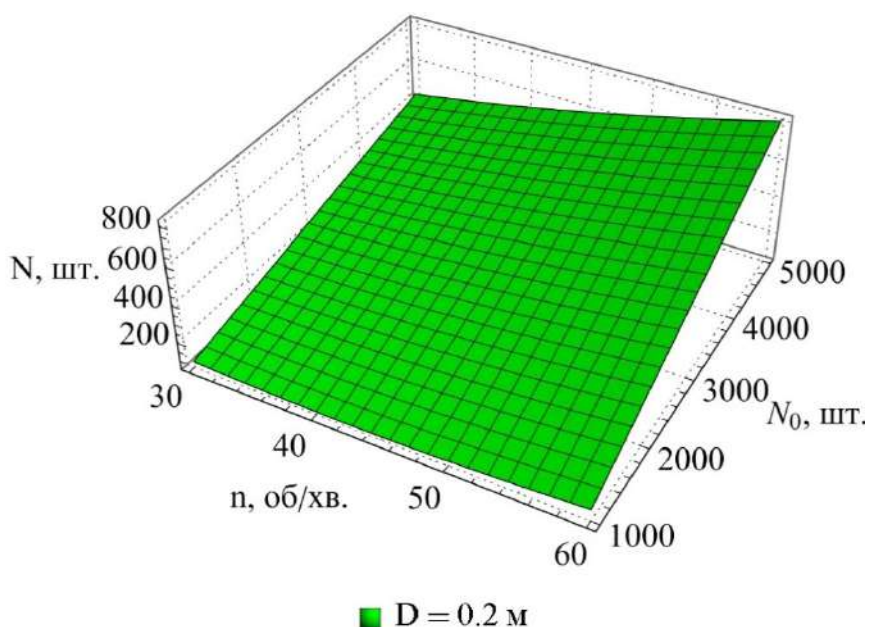


Рисунок 2.20 – Залежність значень кількості всіх компонентів насіннєвої суміші N , які знаходилися в межах мінімального θ_{\min} і максимального θ_{\max} кутів повороту циліндру трієрного сепаратора від частоти обертання циліндра трієра n та кількості насінин і домішок в насіннєвій суміші N_0

Статистичний аналіз рівнянь (2.27) в досліджуваному діапазоні варіювання показав, що коефіцієнт кореляції Пірсона складає 0,83. В свою чергу критерій Фішера складає $F_{(2.27)} = 1,11 < F_T = 1,87$. Це підтверджує адекватність отриманих моделей.

Обробка отриманих даних (додаток А) в програмному пакеті Wolfram Cloud дозволила отримати рівняння регресії другого порядку (додаток Б), яке показує залежність відносного вмісту домішок ε в насіннєвій суміші, яка знаходилася в межах мінімального θ_{\min} і максимального θ_{\max} кутів повороту циліндру трієрного сепаратора від факторів досліджень в закодованому вигляді:

$$\varepsilon = 11,9176 - 11,2438 x_1 + 5,25111 x_1^2 + 1,25032 x_2 + 0,95207 x_1 x_2 - 0,203757 x_2^2 + 2,28584 x_3 + 0,593043 x_1 x_3 - 2,9289 x_2 x_3 + 4,12055 x_3^2. \quad (2.28)$$

Статистична обробка рівняння (2.28) приведені в таблиці 2.5.

Таблиця 2.5 – Результати статистичної обробки рівняння (2.28)

Коефіцієнт	Значення	Помилка	Критерій Стьюдента	Ймовірність
a_{00}	11,9176	0,866702	13,7505	$6,51748 \cdot 10^{-21}$
a_{10}	-11,2438	0,438604	-25,6353	$1,06553 \cdot 10^{-35}$
a_{20}	1,25032	0,506456	2,46876	0,0161966
a_{30}	2,28584	0,506456	4,51339	0,0000274407
a_{12}	0,95207	0,62028	1,5349	0,129661
a_{13}	0,593043	0,62028	0,956089	0,34257
a_{23}	-2,9289	0,716237	-4,08929	0,000121504
a_{11}	5,25111	0,759684	6,91222	$2,47842 \cdot 10^{-9}$
a_{22}	-0,203757	0,856067	-0,238015	0,812618
a_{33}	4,12055	0,856067	4,81335	$9,21338 \cdot 10^{-6}$

Порівнюючи розрахований критерій Стьюдента із табличним $t_{0,05}(125) = 1,98$ проведемо відхилення незначущих коефіцієнтів регресії. В результаті перетворимо рівняння (2.28):

$$\varepsilon = 11,9176 - 11,2438 x_1 + 5,25111 x_1^2 + 1,25032 x_2 + 2,28584 x_3 - 2,9289 x_2 x_3 + 4,12055 x_3^2. \quad (2.29)$$

Підставляючи в рівняння (2.29) замість x_1 – x_3 вирази для факторів досліджень в явному вигляді отримуємо залежність відносного вмісту домішок ε в насіннєвій суміші, яка знаходилася в межах мінімального θ_{\min} і максимального θ_{\max} кутів повороту циліндру трієрного сепаратора від факторів досліджень в розкодованому вигляді:

$$\begin{aligned} \varepsilon = & 44,321 - 161,241 D + 131,278 D^2 + 0,376244 n - \\ & - 0,000644556 N_0 - 0,00009763 n N_0 + 1,03014 \cdot 10^{-6} N_0^2. \end{aligned} \quad (2.30)$$

Оптимальні значення факторів при умові мінімуму відносного вмісту домішок в насіннєвій суміші ($\varepsilon = 3,02\%$) складають $D = 0,6$ м, $n = 30$ об/хв., $N_0 = 1734$ шт.

Графічна інтерпретація залежності (2.31) представлена на рис. 2.21–2.23. На рисунку 2.21 представлено залежність відносного вмісту домішок ε в насіннєвій суміші, яка знаходилася в межах мінімального θ_{\min} і максимального θ_{\max} кутів повороту циліндру трієрного сепаратора від діаметра циліндра трієра D та частоти обертання циліндра трієра n . З рисунку видно, що зі зменшенням діаметру циліндра D збільшується відносний вміст домішок ε в насіннєвій суміші. Це пояснюється тим, що за меншого діаметру ефективність розділення насіннєвого матеріалу значно знижується. Частота обертання циліндра n також впливає на відносний вміст домішок у насіннєвому матеріалі. При збільшенні значень частоти n збільшується відносний вміст домішок ε .

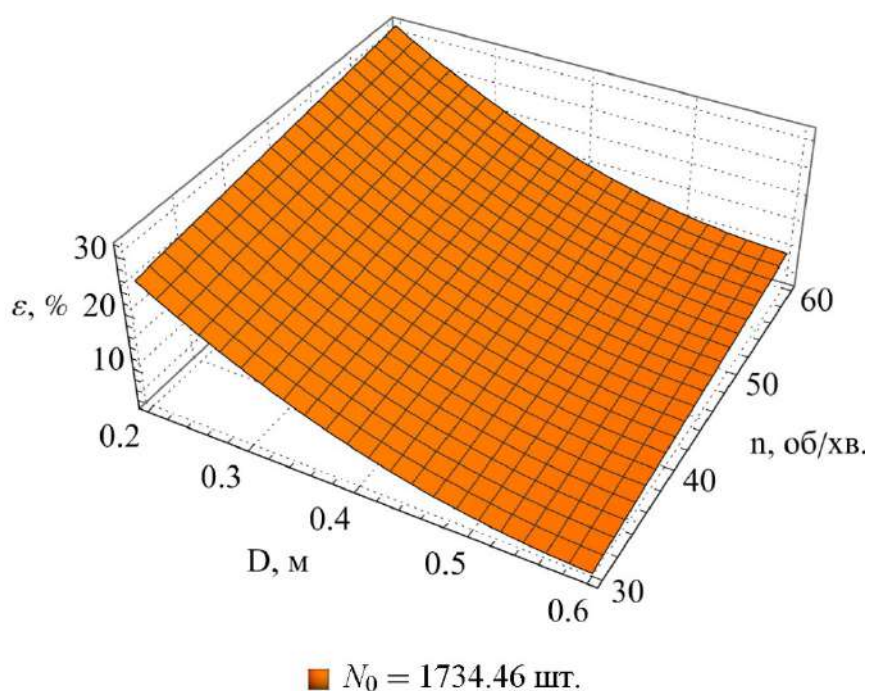


Рисунок 2.21 – Залежність відносного вмісту домішок ε в насіннєвій суміші, яка знаходилася в межах мінімального θ_{\min} і максимального θ_{\max} кутів повороту циліндру трієрного сепаратора від діаметра циліндра трієра D та частоти обертання циліндра трієра n

На рисунку 2.22 показано залежність значень відносного вмісту домішок ε в насіннєвій суміші, яка знаходилася в межах мінімального θ_{\min} і максимального θ_{\max} кутів повороту циліндру трієрного сепаратора від діаметра циліндра трієра D та кількості насінин і домішок в насіннєвій суміші N_0 . З рисунку видно, що відносний вміст домішок ε в насіннєвій суміші зростає зі зменшенням діаметру циліндра та збільшенням кількості насінин і домішок в насіннєвій суміші N_0 . Максимальну кількість насіннєвого матеріалу ($N_0 = 4000$ шт, $N_0 = 5000$ шт) раціональніше розділяти за допомогою циліндра з більшим діаметром, а саме $D = 0,5-0,6$ м.

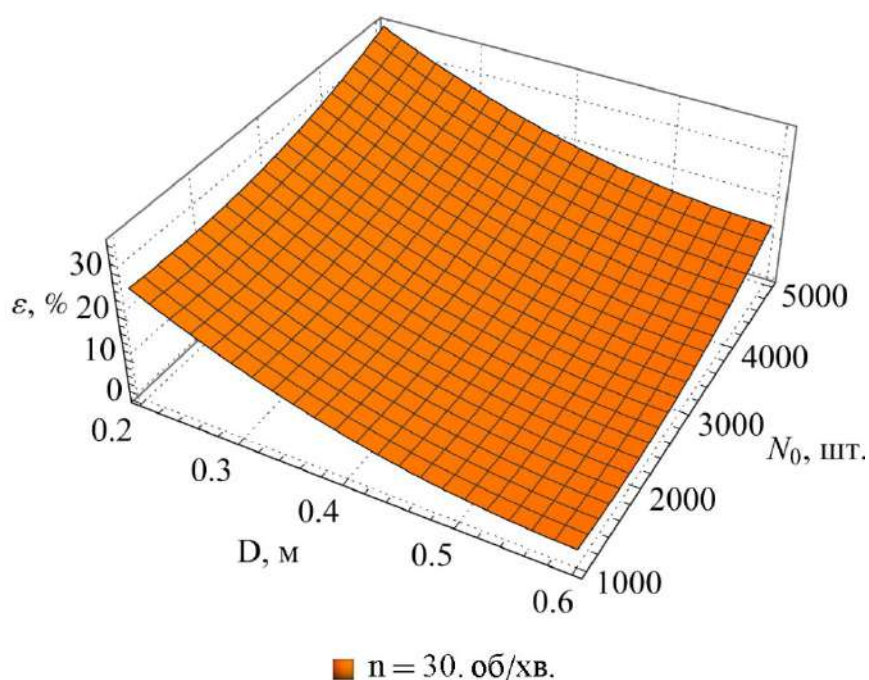


Рисунок 2.22 – Залежність значень відносного вмісту домішок ε в насіннєвій суміші, яка знаходилася в межах мінімального θ_{\min} і максимального θ_{\max} кутів повороту циліндру трієрного сепаратора від діаметра циліндра трієра D та кількості насінин і домішок в насіннєвій суміші N_0

На рисунку 2.23 показано залежність значень відносного вмісту домішок ε в насіннєвій суміші, яка знаходилася в межах мінімального θ_{\min} і максимального θ_{\max} кутів повороту циліндру трієрного сепаратора від частоти обертання циліндра трієра n та кількості насінин і домішок в насіннєвій суміші N_0 . З рисунку видно, що найбільші значення відносного вмісту домішок ε відбуваються у двох випадках: при

мінімальному значенні частоти обертання циліндра $n = 30$ об/хв. та максимальній кількості насінневої суміші $N_0 = 5000$ шт відносний вміст домішок ε в насінневі суміші становить $\varepsilon = 13$ %; при максимальному значенні частоти обертання циліндра $n = 60$ об/хв. та мінімальній кількості насінневої суміші $N_0 = 1000$ шт. відносний вміст домішок ε в насінневі суміші становить $\varepsilon = 12-14$ %.

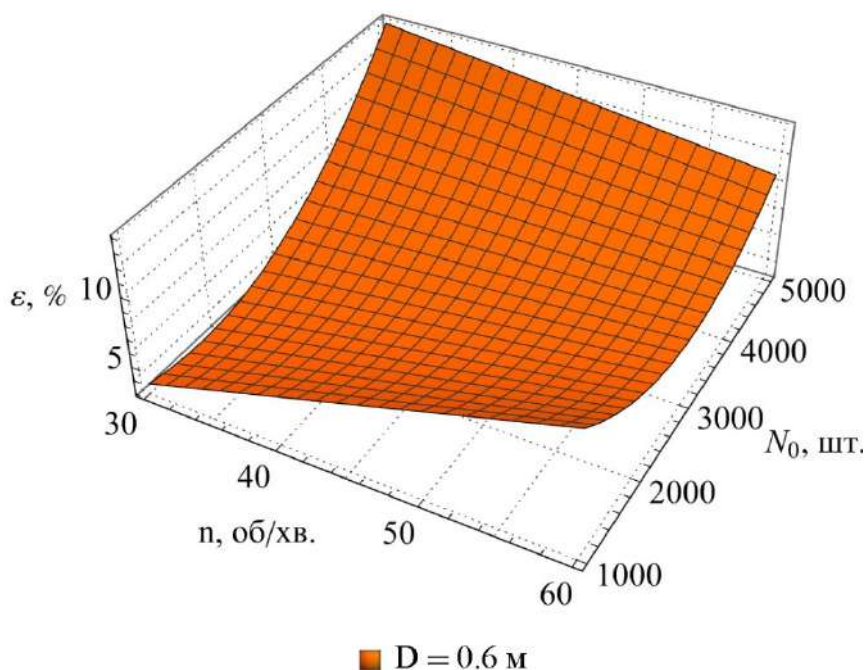


Рисунок 2.23 – Залежність значень відносного вмісту домішок ε в насінневі суміші, яка знаходилася в межах мінімального θ_{\min} і максимального θ_{\max} кутів повороту циліндру трієрного сепаратора від частоти обертання циліндра трієра n та кількості насінин і домішок в насінневі суміші N_0

Статистичний аналіз рівнянь (2.30) в досліджуваному діапазоні варіювання показав, що коефіцієнт кореляції Пірсона складає 0,88. В свою чергу критерій Фішера складає $F_{(2,28)} = 1,81 < F_T = 2,49$. Це підтверджує адекватність отриманих моделей.

В зв'язку з тим що для кожного критерію оцінки досліджу визначені оптимальні значення факторів, які не співпадають вирішимо компромісну задачу, яка має вигляд:

$$\begin{cases} \varepsilon(D, n, N_0) \rightarrow \min, \\ N(D, n, N_0) \rightarrow \max. \end{cases} \quad (2.31)$$

Задачу (2.31) будемо вирішувати методом скалярного ранжування шляхом мінімізації мультиплікативної функції із врахування коефіцієнта важливості приватного критерію:

$$\frac{N}{\max(N)} / \frac{\varepsilon}{\max(\varepsilon)} \rightarrow \max \quad (2.32)$$

де \max – максимальне значення функції.

Вирішуючи в програмному пакеті Wolfram Cloud (додаток Б) рівняння (2.32) спільно з (2.27) і (2.30) отримуємо раціональні конструктивно-технологічні параметри трієрного сепаратора: $D = 0,38$ м, $n = 46,8$ об/хв., $N_0 = 2722$ шт. При цих параметрах критерії оптимізації дорівнювали $N = 251$ шт., $\varepsilon = 5,89$ %, $\theta_{\min} = 0,22$ рад., $\theta_{\max} = 1,26$ рад.

2.4 Результати чисельного моделювання процесу сепарації насіннєвого матеріалу дрібнонасіннєвих культур на селекційно-насінницькому трієр при змінній частоті обертання

Прийнявши отримані вище параметри ($D = 0,38$ м, $n = 46,8$ об/хв., $N_0 = 2722$ шт.), перейдемо до третього етапу теоретичних досліджень, а саме до дослідження впливу зміни напрямку обертання циліндра на якість процесу сепарації.

Розрахункова схема селекційно-насінницького трієра і результати чисельного моделювання із прийнятими параметрами ($D = 0,38$ м, $n = 46,8$ об/хв., $N_0 = 2722$ шт., $\theta_1 = 0,56$ рад = $32,1$ °) представлена на рис. 2.24. Відмінність нової розрахункової схеми від схеми на рис. 2.10 полягає в наявності лотка для забору насіння, який нахилений на кут θ_1 між горизонтальної лінії і стінкою лотка. В результаті переміщення компонента насіннєвої суміші, яке знаходиться в чарунці, відбувається наповнення лотка насінням і домішками. Отримана суміш характеризується

кількістю насінин і домішок в насіннєвій суміші лотка N_1 і відносного вмісту домішок ε_1 в насіннєвій суміші лотка.

Моделі чисельного моделювання, початкові і граничні умови відповідають розділу 2.2.

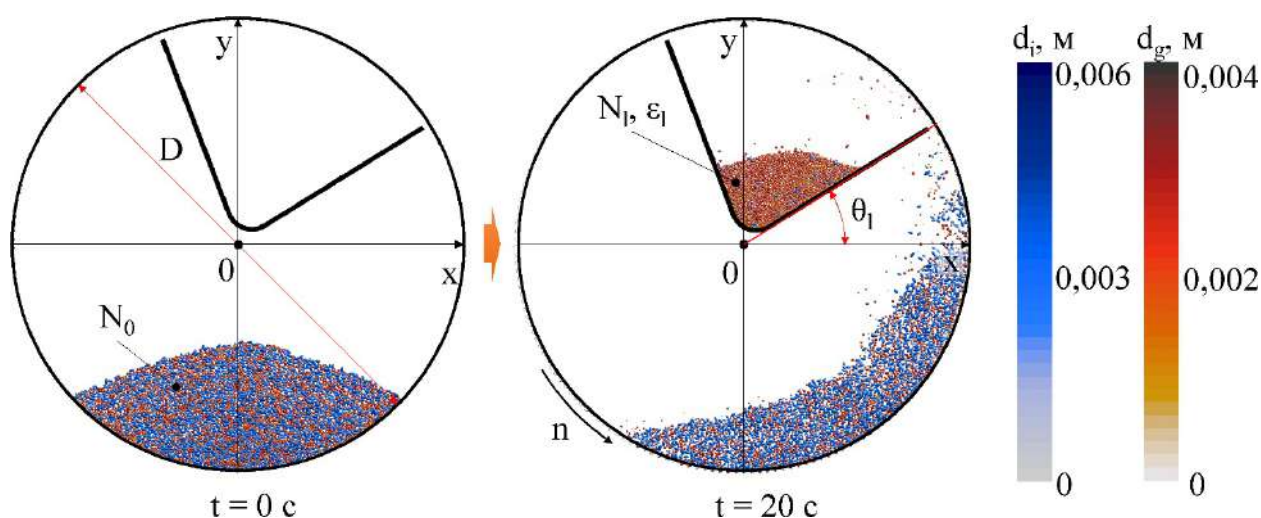


Рисунок 2.24 – Розрахункова схема селекційно-насінницького трієра із лотком для чисельного моделювання в програмному пакеті Simcenter Star-CCM+

На рис. 2.25 представлено скалярну і векторну візуалізацію процесу сепарації насіннєвого матеріалу дрібнонасіннєвих культур на селекційно-насінницькому трієрі із лотком.

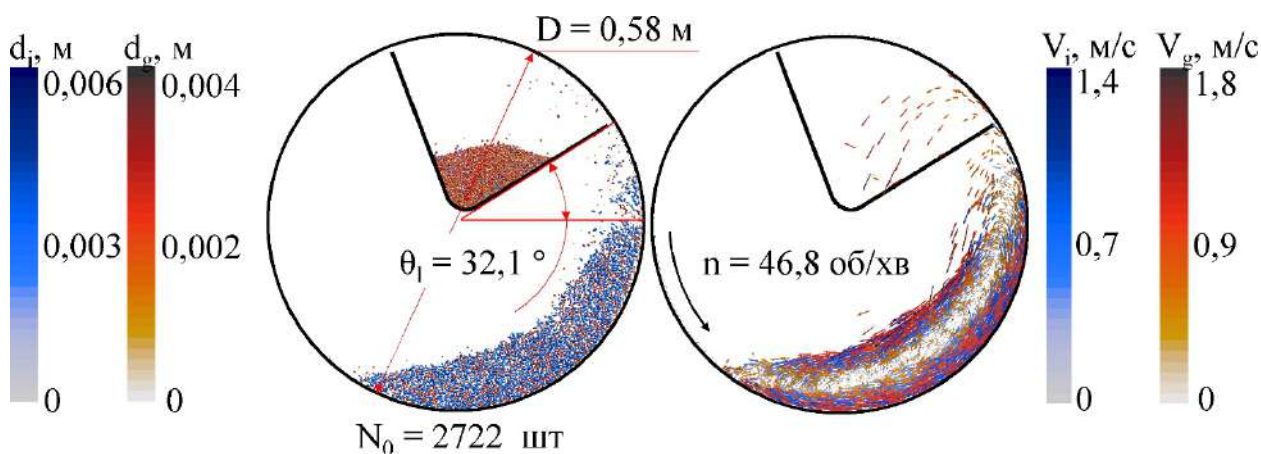


Рисунок 2.25 – Скалярна і векторна візуалізація процесу сепарації насіннєвого матеріалу дрібнонасіннєвих культур на селекційно-насінницькому трієрі із лотком

На рис. 2.26 приведена динаміка зміни кількості насінин і домішок N_1 і відносного вмісту домішок ε_1 в насіннєвій суміші лотка. Аналіз отриманої залежності показує, що при досягненні значення $N_1 = 1902$ шт. ріст кількості компонентів в насіннєвій суміші лотка практично припиняється, що свідчить про повне переміщення насінин до лотка. Незначне подальше збільшення кількості компонентів в насіннєвій суміші лотка відбувається через потрапляння домішок, що в свою чергу призводить до збільшення вмісту домішок ε_1 в насіннєвій суміші лотка. Оптимальне значення часу сепарації складає $t_{opt} = 24,8$ с – час перебування насіннєвої суміші в циліндрі, при якому досягається найкраща якість сепарації при найбільшій продуктивності (вмісту домішок в насіннєвій суміші лотка $\varepsilon_1 = 4,9$ %). Умовна продуктивність процесу складає $Q_1 = N_1/t_{opt} = 76,7$ шт/с.

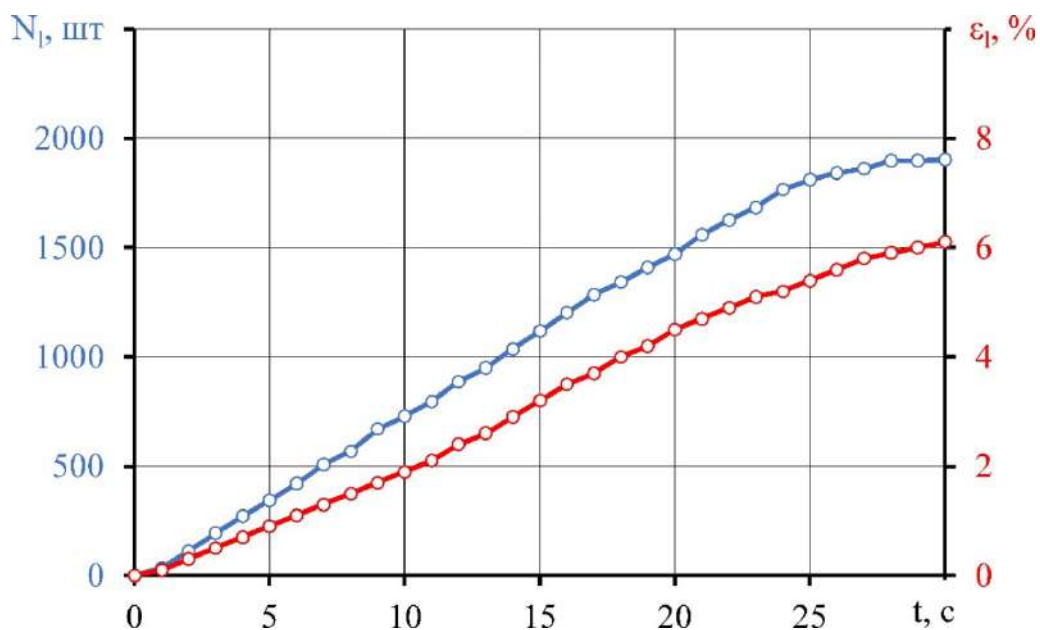


Рисунок 2.26 – Динаміка зміни кількості насінин і домішок N_1 і відносного вмісту домішок ε_1 в насіннєвій суміші лотка

Для забезпечення зменшення часу сепарації (підвищення продуктивності) приймаємо наступну гіпотезу: періодична зміни напрямку обертання циліндра трієра впливає на якість і продуктивність процесу сепарації.

В якості факторів досліджень обрано: тривалість обертання циліндру проти годинникової стрілки T_L (10 с, 20 с, 30 с) – x_4 і за годинниковою стрілкою T_R (2 с,

4 с, 6 с) – x_5 . Критеріями оцінки є кількість насінин і домішок N_1 і відносний вміст домішок ε_1 в насіннєвій суміші лотка.

В результаті чисельного моделювання процесу сепарації насіннєвого матеріалу дрібнонасіннєвих культур на селекційно-насінницькому трієрі при змінній частоті обертання отримано візуалізацію, яка представлена на рис. 2.27–2.28.

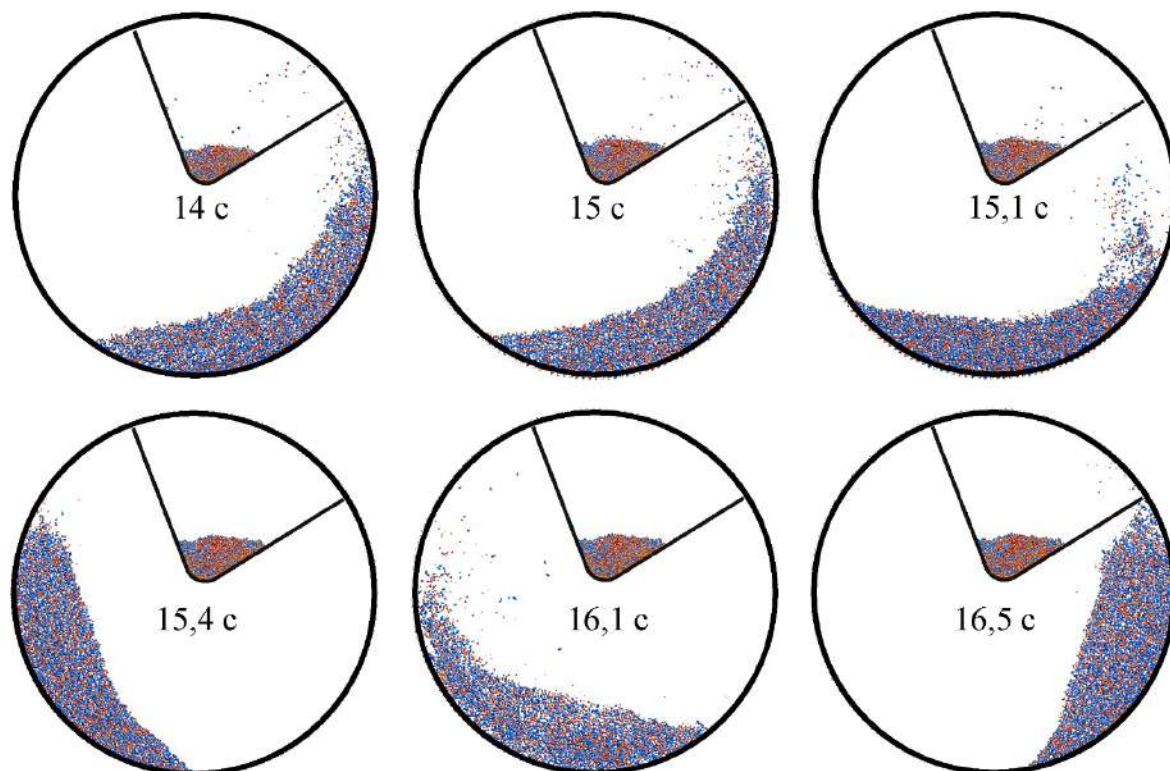


Рисунок 2.27 – Візуалізація розподілу компонентів насіннєвої суміші в селекційно-насінницькому трієрі при змінній частоті обертання циліндру при $T_L = 10$ с, $T_R = 2$ с

З рисунку 2.27 видно, що зі збільшенням тривалості обертання циліндру трієра збільшується вміст насіння основної культури в лотку, але в барабані циліндра має місце утворення «мертвого шару» насіннєвої суміші, що підтверджує візуалізація векторного поля швидкостей компонентів насіннєвої суміші в селекційно-насінницькому трієрі, яка зображена на рисунку 2.28. Зміна напрямку обертання циліндра дозволяє перемішати утворений в барабані циліндра трієра «мертвий шар» насіннєвого матеріалу, що підвищить ефективність сепарації за рахунок переміщення більшої кількості насіння основної культури в лоток.

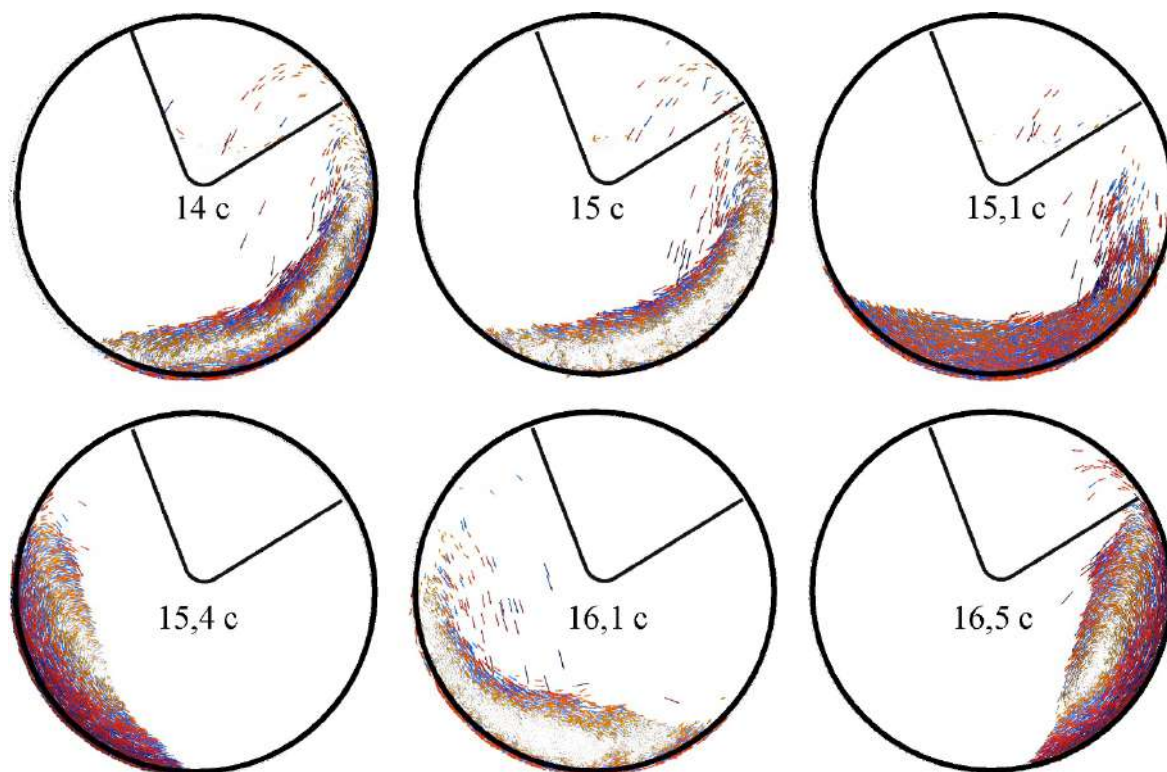


Рисунок 2.28 – Візуалізація векторного поля швидкостей компонентів насінневої суміші в селекційно-насінницькому трієрі при змінній частоті обертання циліндру при $T_L = 15$ с, $T_R = 1$ с

Обробка отриманих даних (додаток В) в програмному пакеті Wolfram Cloud дозволила отримати рівняння регресії (додаток Г), яке показує залежність кількості насінин і домішок N_1 в насінневій суміші лотка від факторів досліджень в закодованому вигляді:

$$N_1 = 1840,19 + 479,111 x_4 - 353,778 x_4^2 + 2,88889 x_5 - 0,75 x_4 x_5 - 8,11111 x_5^2. \quad (2.33)$$

Статистична обробка рівняння (2.33) приведені в таблиці 2.6.

Порівнюючи розрахований критерій Стюдента із табличним $t_{0,05}(18) = 2,10$ проведемо відхилення незначущих коефіцієнтів регресії. В результаті перетворимо рівняння (2.33):

$$N_1 = 1840,19 + 479,111 x_4 - 353,778 x_4^2. \quad (2.34)$$

Підставляючи в рівняння (2.34) замість x_1 – x_2 вирази для факторів досліджень в явному вигляді отримуємо залежність кількості насінин і домішок N_1 в насіннєвій суміші лотка від факторів досліджень в розкодованому вигляді:

$$N_1 = -533,148 + 189,422 T_L - 3.53778 T_L^2. \quad (2.35)$$

Таблиця 2.6 – Результати статистичної обробки рівняння (2.33)

Коефіцієнт	Значення	Помилка	Критерій Стюдента	Ймовірність
a_{00}	1840,19	11,1267	165,384	$4,87449 \cdot 10^{-7}$
a_{40}	479,111	6,09435	78,6156	$4,53619 \cdot 10^{-6}$
a_{50}	2,88889	6,09435	0,474027	0,667845
a_{45}	-0,75	7,46403	-0,100482	0,9263
a_{44}	-353,778	10,5557	-33,5152	0,000058392
a_{55}	-8,11111	10,5557	-0,768409	0,498193

Оптимальні значення факторів при умові максимуму кількості насінин і домішок в насіннєвій суміші лотка ($N_1 = 2002$ шт.) складають $T_L = 26,7$ с.

Графічна інтерпретація залежності (2.35) представлена на рис. 2.29.

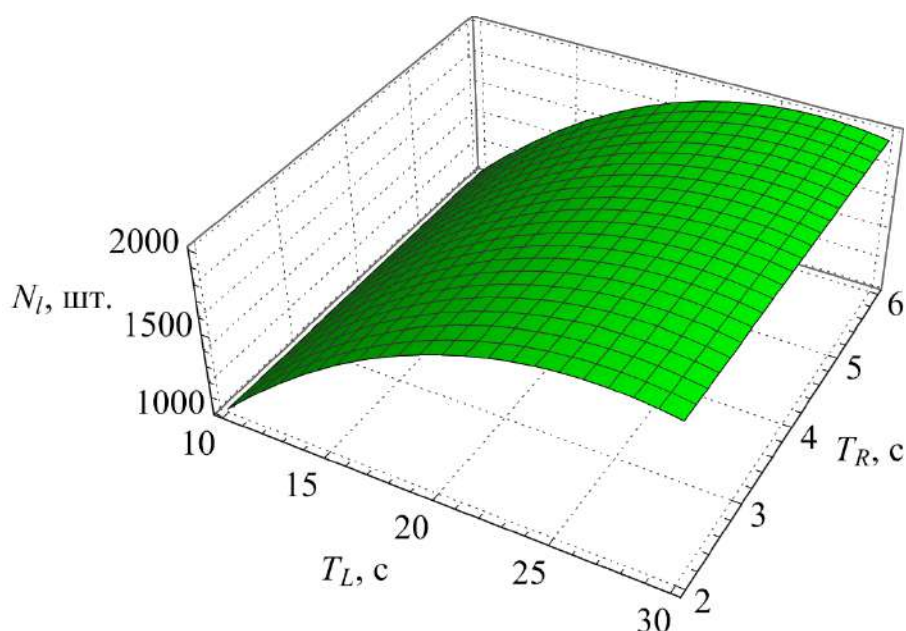


Рисунок 2.29 – Залежність кількості насінин і домішок N_1 в насіннєвій суміші лотка від тривалості обертання циліндру проти годинникової стрілки T_L і за годинниковою стрілкою T_R

На рисунку 2.29 зображено графік залежності кількості насінин і домішок N_1 в насіннєвій суміші лотка від тривалості обертання циліндру проти годинникової стрілки T_L і за годинниковою стрілкою T_R . З графіка видно, що збільшення кількості насінин і домішок спостерігається при збільшенні тривалості обертання циліндру проти годинникової стрілки T_L . Після досягнення оптимальної тривалості обертання циліндру проти годинникової стрілки T_L вміст насіннєвої суміші лотка знижується. Збільшення тривалості обертання циліндру за годинниковою стрілкою T_R незначно зменшує кількість насінин і домішок у насіннєвій суміші лотка.

Статистичний аналіз рівнянь (2.35) в досліджуваному діапазоні варіювання показав, що коефіцієнт кореляції Пірсона складає 0,90. В свою чергу критерій Фішера складає $F_{(2.35)} = 2,42 < F_T = 2,93$. Це підтверджує адекватність отриманих моделей.

Обробка отриманих даних (додаток В) в програмному пакеті Wolfram Cloud дозволила отримати рівняння регресії (додаток Г), яке показує залежність відносного вмісту домішок ε_1 в насіннєвій суміші лотка від факторів досліджень в закодованому вигляді:

$$\varepsilon_1 = 4,64021 + 1,28254 x_4 + 0,534921 x_4^2 - 0,244444 x_5 + 0,0559524 x_4 x_5 + 0,00634921 x_5^2. \quad (2.36)$$

Статистична обробка рівняння (2.36) приведені в таблиці 2.7.

Таблиця 2.7 – Результати статистичної обробки рівняння (2.36)

Коефіцієнт	Значення	Помилка	Критерій Стьюдента	Ймовірність
a_{00}	4,64021	0,0617098	75,1941	$5,18374 \cdot 10^{-6}$
a_{40}	1,28254	0,0337999	37,9451	0,0000402641
a_{50}	-0,244444	0,0337999	-7,23212	0,00545208
a_{45}	0,0559524	0,0413962	1,35163	0,269376
a_{44}	0,534921	0,0585431	9,13722	0,00277085
a_{55}	0,00634921	0,0585431	0,108454	0,920483

Підставляючи в рівняння (2.37) замість x_1-x_2 вирази для факторів досліджень в явному вигляді отримуємо залежність відносного вмісту домішок ϵ_1 в насіннєвій суміші лотка від факторів досліджень в розкодованому вигляді:

$$\epsilon_1 = 4,7037 - 0,0857143 T_L + 0,00534921 T_L^2 - 0,122222 T_R. \quad (2.38)$$

Оптимальні значення факторів при умові мінімуму відносного вмісту домішок в насіннєвій суміші лотка ($\epsilon_1 = 3,64\%$) складають $T_L = 10$ с, $T_R = 6$ с.

Графічна інтерпретація залежності (2.38) представлена на рис. 2.30.

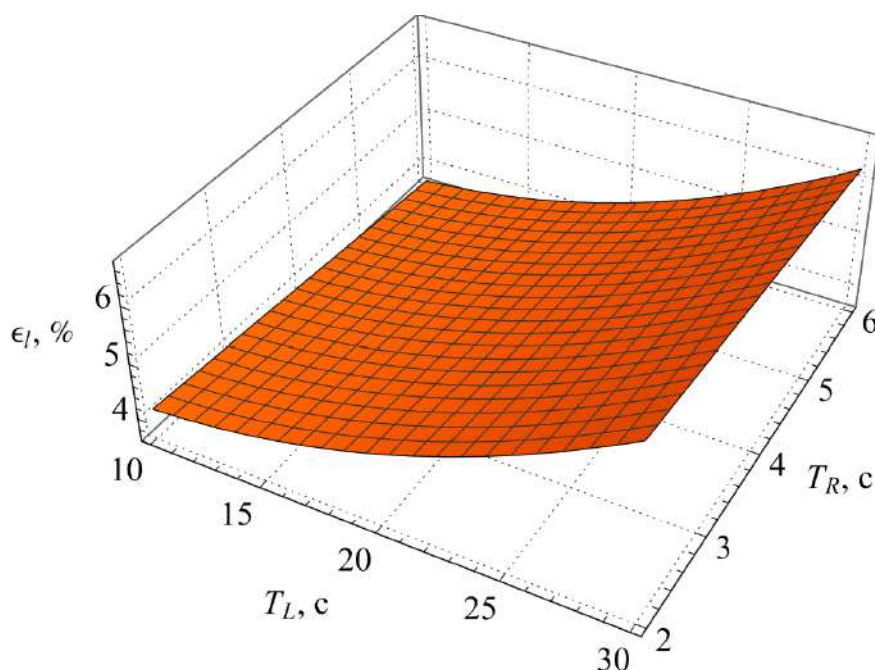


Рисунок 2.30 – Залежність відносного вмісту домішок ϵ_1 в насіннєвій суміші лотка від тривалості обертання циліндру проти годинникової стрілки T_L і за годинниковою стрілкою T_R

На рисунку 2.30 зображено залежність відносного вмісту домішок ϵ_1 в насіннєвій суміші лотка від тривалості обертання циліндру проти годинникової стрілки T_L і за годинниковою стрілкою T_R . З рисунку видно, що зі збільшенням тривалості обертання циліндру проти годинникової стрілки T_L зростає відносний вміст домішок у насіннєвій суміші лотка. Збільшення тривалості обертання циліндру за годинниковою стрілкою T_R зменшує відносний вміст домішок у насіннєвій суміші лотка.

Статистичний аналіз рівнянь (2.38) в досліджуваному діапазоні варіювання показав, що коефіцієнт кореляції Пірсона складає 0,87. В свою чергу критерій Фішера складає $F_{(2.38)} = 2,51 < F_T = 2,93$. Це підтверджує адекватність отриманих моделей.

Обробка отриманих даних (додаток В) в програмному пакеті Wolfram Cloud дозволила отримати рівняння регресії (додаток Г), яке показує залежність умовної продуктивності сепаратора Q_N від факторів досліджень в закодованому вигляді:

$$Q_N = 76,0729 - 7,16424 x_4 - 11,7434 x_4^2 - 6,23065 x_5 + 3,09896 x_4 x_5 + 0,277315 x_5^2. \quad (2.39)$$

Статистична обробка рівняння (2.39) приведені в таблиці 2.8.

Таблиця 2.8 – Результати статистичної обробки рівняння (2.39)

Коефіцієнт	Значення	Помилка	Критерій Стьюдента	Ймовірність
a_{00}	76,0729	0,429806	176,993	$3,97694 \cdot 10^{-7}$
a_{40}	-7,16424	0,235415	-30,4325	0,0000779424
a_{50}	-6,23065	0,235415	-26,4667	0,000118343
a_{45}	3,09896	0,288323	10,7482	0,00172222
a_{44}	-11,7434	0,40775	-28,8006	0,0000919146
a_{55}	0,277315	0,40775	0,680111	0,545216

Порівнюючи розрахований критерій Стьюдента із табличним $t_{0,05}(18) = 2,10$ проведемо відхилення незначущих коефіцієнтів регресії. В результаті перетворимо рівняння (2.39):

$$Q_N = 76,0729 - 7,16424 x_4 - 11,7434 x_4^2 - 6,23065 x_5 + 3,09896 x_4 x_5. \quad (2.40)$$

Підставляючи в рівняння (2.40) замість x_1-x_2 вирази для факторів досліджень в явному вигляді отримуємо залежність умовної продуктивності сепаратора Q_N від факторів досліджень в розкодованому вигляді:

$$Q_N = 68,2847 + 3,36116 T_L - 0,117434 T_L^2 - 6,21428 T_R + 0,154948 T_L T_R. \quad (2.41)$$

Оптимальні значення факторів при умові максимуму умовної продуктивності сепаратора ($Q_N = 84,55$ шт./с) складають $T_L = 15,63$ с, $T_R = 2$ с.

Графічна інтерпретація залежності (2.41) представлена на рис. 2.31.

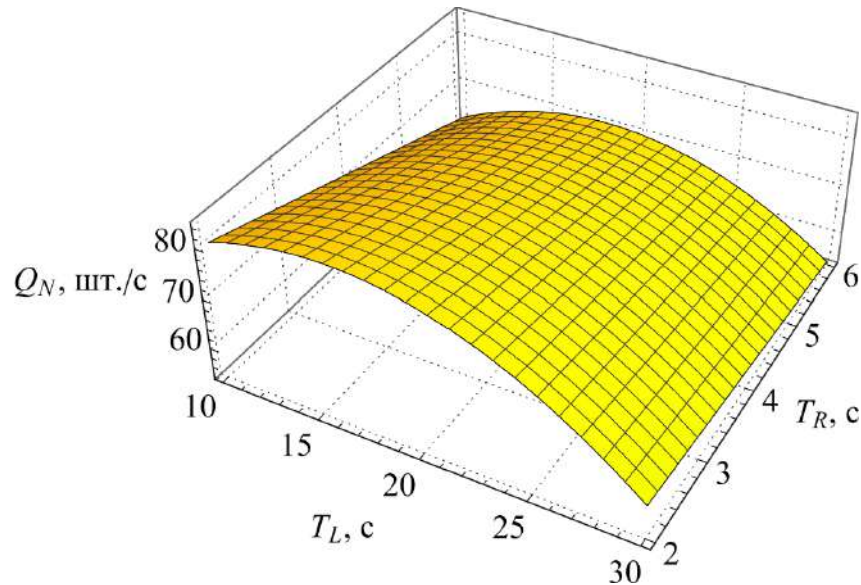


Рисунок 2.31 – Залежність умовної продуктивності сепаратора Q_N від тривалості обертання циліндру проти годинникової стрілки T_L і за годинниковою стрілкою T_R

На рисунку 2.32 зображено графік залежності умовної продуктивності сепаратора Q_N від тривалості обертання циліндру проти годинникової стрілки T_L і за годинниковою стрілкою T_R . З графіку видно, що зі збільшенням тривалості обертання циліндру проти годинникової стрілки T_L умовна продуктивність сепаратора Q_N знижується. Збільшення тривалості обертання циліндра за годинниковою стрілкою T_R також знижує умовну продуктивність сепаратора Q_N .

Статистичний аналіз рівнянь (2.41) в досліджуваному діапазоні варіювання показав, що коефіцієнт кореляції Пірсона складає 0,93. В свою чергу критерій Фішера складає $F_{(2,38)} = 2,23 < F_T = 2,93$. Це підтверджує адекватність отриманих моделей.

В зв'язку з тим що для кожного критерію оцінки дослідів визначені оптимальні значення факторів, які не співпадають, вирішимо компромісну задачу, яка має вигляд:

$$\begin{cases} \varepsilon_1(T_L, T_R) \rightarrow \min, \\ Q_N(T_L, T_R) \rightarrow \max. \end{cases} \quad (2.42)$$

Задачу (2.42) будемо вирішувати методом скалярного ранжування шляхом максимізації мультиплікативної функції із врахування коефіцієнта важливості приватного критерію:

$$\frac{Q_N}{\max(Q_N)} / \frac{\varepsilon_1}{\max(\varepsilon_1)} \rightarrow \max \quad (2.43)$$

де \max – максимальне значення функції.

Вирішуючи в програмному пакеті Wolfram Cloud (додаток Г) рівняння (2.43) спільно з (2.38) і (2.41) отримуємо раціональні режимні параметри трієрного сепаратора: $T_L = 13,3$ с, $T_R = 2$ с. При цих параметрах критерії оптимізації дорівнювали $Q_N = 83,9$ шт./с, $\varepsilon_1 = 4,26$ %.

2.5 Висновки з розділу

1. В результаті аналітичних досліджень процесу взаємодії компонентів насінневої суміші дрібнонасінневих культур із робочим органом селекційно-насінницького трієра отримано залежність кута відхилення центра мас компонента насінневої суміші від кута повороту циліндра $\beta(\theta)$. Отримана залежність дає змогу визначити мінімальний кут повороту циліндра із чарунками при якому починає обертатися компонент насінневої суміші відносно центра мас: $\theta_{\min}(n = 30 \text{ об/хв.}, D = 0,2 \text{ м}) = 0,12 \text{ рад.} = 6,9^\circ$; $\theta_{\min}(n = 45 \text{ об/хв.}, D = 0,2 \text{ м}) = 0,33 \text{ рад.} = 18,9^\circ$; $\theta_{\min}(n = 60 \text{ об/хв.}, D = 0,2 \text{ м}) = 0,52 \text{ рад.} = 29,8^\circ$; $\theta_{\min}(n = 30 \text{ об/хв.}, D = 0,4 \text{ м}) = 0,18 \text{ рад.} = 10,3^\circ$; $\theta_{\min}(n = 30 \text{ об/хв.}, D = 0,6 \text{ м}) = 0,29 \text{ рад.} = 16,6^\circ$.

2. Розроблено модель процесу сепарації насінневого матеріалу дрібнонасінневих культур на селекційно-насінницькому трієрі в програмному пакеті Simcenter Star-CCM+. Спираючись на фізико-механічні властивості насінневого матеріалу на прикладі насіння гірчиці, заданих початкових і граничних умов селекційно-насінницького трієра отримано візуалізацію процесу сепарації в залежності від факторів досліджень (кількості насінин і домішок в насінневій суміші N_0 , частоти обертання циліндра трієра n і діаметра циліндра трієра D).

3. В результаті чисельного моделювання процесу сепарації насінневого матеріалу дрібнонасінневих культур на селекційно-насінницькому трієрі в програмному пакеті Simcenter Star-CCM+ отримані залежності у вигляді рівнянь регресії другого порядку значень мінімального θ_{\min} і максимального θ_{\max} кутів виходу насіння з чарунок циліндра трієра від факторів досліджень (2.23)–(2.24).

4. В якості критерію продуктивності було обрано кількість всіх компонентів насінневої суміші N , які знаходилися в межах мінімального θ_{\min} і максимального θ_{\max} кутів повороту циліндру трієра. За результатами моделювання отримано залежність у вигляді рівняння регресії другого порядку кількості всіх компонентів насінневої суміші N від факторів досліджень (2.27).

5. В якості критерію оцінки якості процесу сепарації було прийнято відносний вміст домішок ε в насінневій суміші, яка знаходилася в межах мінімального θ_{\min} і максимального θ_{\max} кутів повороту циліндру трієра. За результатами моделювання отримано залежність у вигляді рівнянь регресії другого порядку відносного вмісту домішок ε від факторів досліджень (2.30).

6. Вирішуючи компромісну задачу методом скалярного ранжування шляхом максимізації мультиплікативної функції із врахування коефіцієнта важливості приватного критерію в програмному пакеті Wolfram Cloud, яка зводиться до мінімізації відносного вмісту домішок ε і максимізації кількості всіх компонентів насінневої суміші N , які знаходилися в межах мінімального θ_{\min} і максимального θ_{\max} кутів повороту циліндру, отримані раціональні конструктивно-технологічні параметри селекційно-насінницького трієрного сепаратора: $D = 0,38$ м, $n = 46,8$ об/хв., $N_0 = 2722$ шт. При цих параметрах критерії оптимізації дорівнювали $N = 251$ шт., $\varepsilon = 5,89$ %, $\theta_{\min} = 0,22$ рад., $\theta_{\max} = 1,26$ рад.

7. В результаті чисельного моделювання процесу сепарації насінневого матеріалу дрібнонасінневих культур на селекційно-насінницькому трієрі при змінній частоті обертання отримана динаміка зміни кількості насінин і домішок N_1 і відносного вмісту домішок ε_1 в насінневій суміші лотка (рис. 2.26). Аналіз отриманої залежності показує, що при досягненні значення $N_1 = 1902$ шт. ріст кількості компонентів в насінневій суміші лотка практично припиняється, що свідчить про

повне переміщення насінин до лотка. Оптимальне значення часу сепарації складає $t_{opt} = 24,8$ с – час перебування насінневої суміші в циліндрі, при якому досягається найкраща якість сепарації при найбільшій продуктивності (вміст домішок в насінневій суміші лотка $\varepsilon_1 = 4,9$ %). Умовна продуктивність процесу складає $Q_1 = N_1/t_{opt} = 76,7$ шт/с.

8. В результаті чисельного моделювання процесу сепарації насінневого матеріалу дрібнонасінневих культур на селекційно-насінницькому трієрі при змінній частоті обертання отримані залежності кількості насінин і домішок N_1 (2.35), відносного вмісту домішок ε_1 в насінневій суміші лотка, умовної продуктивності трієра Q_N (2.38) від тривалості обертання циліндру проти годинникової стрілки T_L (2.41) і за годинниковою стрілкою.

9. Вирішуючи компромісну задачу методом скалярного ранжування шляхом максимізації мультиплікативної функції із врахування коефіцієнта важливості приватного критерію в програмному пакеті Wolfram Cloud отримуємо раціональні режимні параметри трієрного сепаратора: $T_L = 13,3$ с, $T_R = 2$ с. При цих параметрах критерії оптимізації дорівнювали $Q_N = 83,9$ шт./с, $\varepsilon_1 = 4,26$ %.

Основні наукові результати розділу опубліковано в працях автора [127, 128, 129, 130, 131, 132, 133, 134, 135].

3 ПРОГРАМА І МЕТОДИКА ПРОВЕДЕННЯ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

3.1 Мета, задачі і програма експериментальних досліджень

Метою проведення експериментальних досліджень є перевірка правильності отриманих теоретичних висновків, експериментальне обґрунтування основних режимів роботи та параметрів селекційно-насінницького трієра для сепарації насінневого матеріалу дрібнонасінневих культур, а також розробка програмного забезпечення та алгоритму роботи для відповідної мехатронної системи.

Для досягнення цієї мети поставлено наступні задачі:

- визначити фізико-механічні властивості дрібнонасінневих культур;
- дослідити процес сепарації дрібнонасінневих культур за геометричними розмірами на селекційно-насінницькому трієрі;
- розробити алгоритм роботи і програмне забезпечення відповідної мехатронної системи;
- визначити раціональні конструктивно-режимні параметри селекційно-насінницького трієра у складі мехатронної системи.

Відповідно до поставлених завдань програмою експериментальних досліджень передбачено:

- проведення лабораторних досліджень з визначення фізико-механічних властивостей дрібнонасінневих культур;
- розроблення й створення селекційно-насінницького трієра;
- проведення експериментальних досліджень з визначення траєкторії польоту насіння дрібнонасінневих культур в селекційно-насінницькому трієрі;
- розробка алгоритму роботи і програмного забезпечення системи розпізнавання траєкторій польоту насіння по відеозображенню;
- розробка й створення експериментального зразка селекційно-насінницького трієра;

– проведення експериментальних досліджень і визначення раціональних конструктивно-режимних параметрів трієрного сепаратора у складі мехатронної системи.

3.2 Методика лабораторних досліджень з визначення фізико-механічних властивостей дрібнонасінневих культур

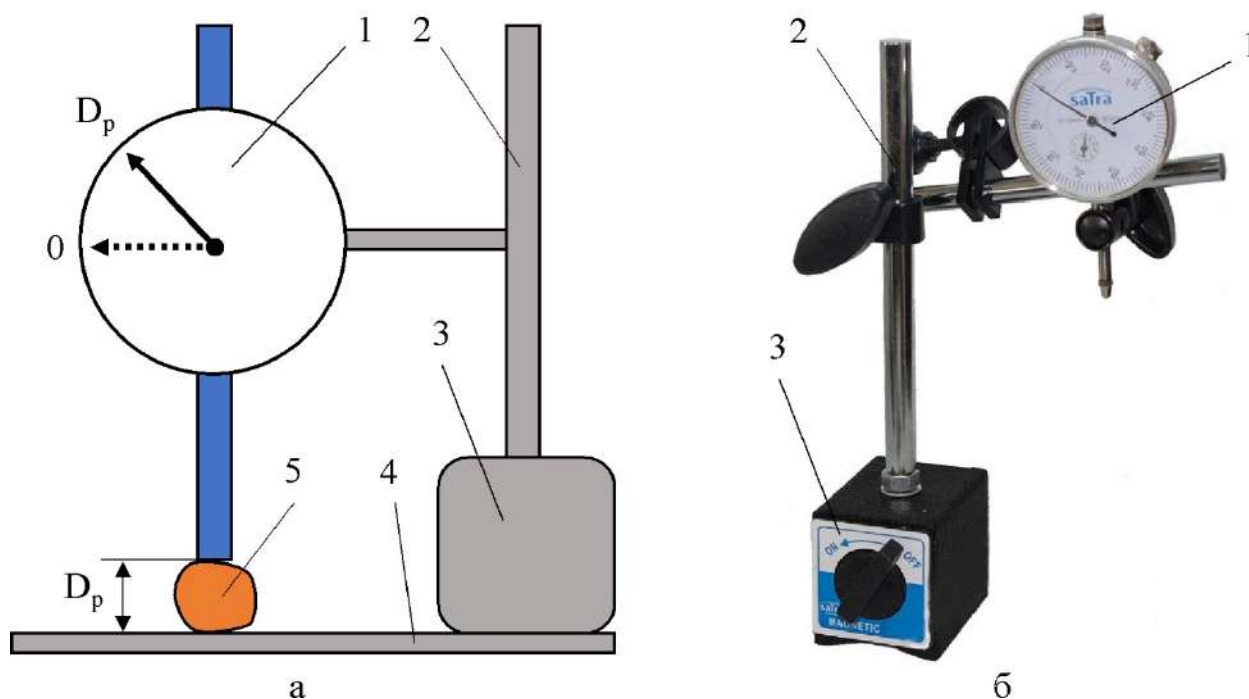
Для отримання адекватних результатів чисельного моделювання процесу сепарації насінневого матеріалу дрібнонасінневих культур необхідно використовувати визначені лабораторним шляхом їх фізико-механічні властивості. Так, формування моделей та емпіричних математичних закономірностей, встановлення раціональних конструктивно-режимних параметрів робочих органів обладнання неможливе без встановлення наступних морфологічних, фізико-механічних і реологічних властивостей насіння: геометричні розміри насінин, маси 1000 насінин, дійсна щільність насіння, коефіцієнт тертя спокою насіння об різні поверхні, коефіцієнт тертя насінин між собою, коефіцієнт Пуассона, модуль Юнга, коефіцієнт відновлення, швидкість витання тощо.

З метою інтенсифікації процесу сепарації насіння дрібнонасінневих культур на трієрному сепараторі пропонується дослідити їх властивості.

В якості об'єктів досліджень обрано насіння гірчиці (Мішутка, Мрія, Новинка, Пріма, Веснянка, Запоріжанка), ріпаку (Анна, Стілуца, Атлант, Соло, Легіон), рижію (Зевс, Престиж, Міраж, Славутич) селекції Інституту олійних культур Національної академії аграрних наук України (м. Запоріжжя).

Дослідження проводилися для вибірки масою 1 кг з партії насіння 2018-2020 р вирощування. Вологість насіння повинна знаходитися в межах 7,0–9,0 %.

Розмірні характеристики випадково обраних 100 насінин визначалися за діаметром кожного насіння D_p . Вимірювання проводилися за допомогою стрілочного індикатора SATRA з точністю до 0,01 мм (рис. 3.1).



а – схема; б – загальний вигляд; 1 – стрілочний індикатор; 2 – штатив;
3 – магнітна основа; 4 – плоский стіл; 5 – насінина

Рисунок 3.1 – Обладнання для вимірювання геометричних розмірів насінин

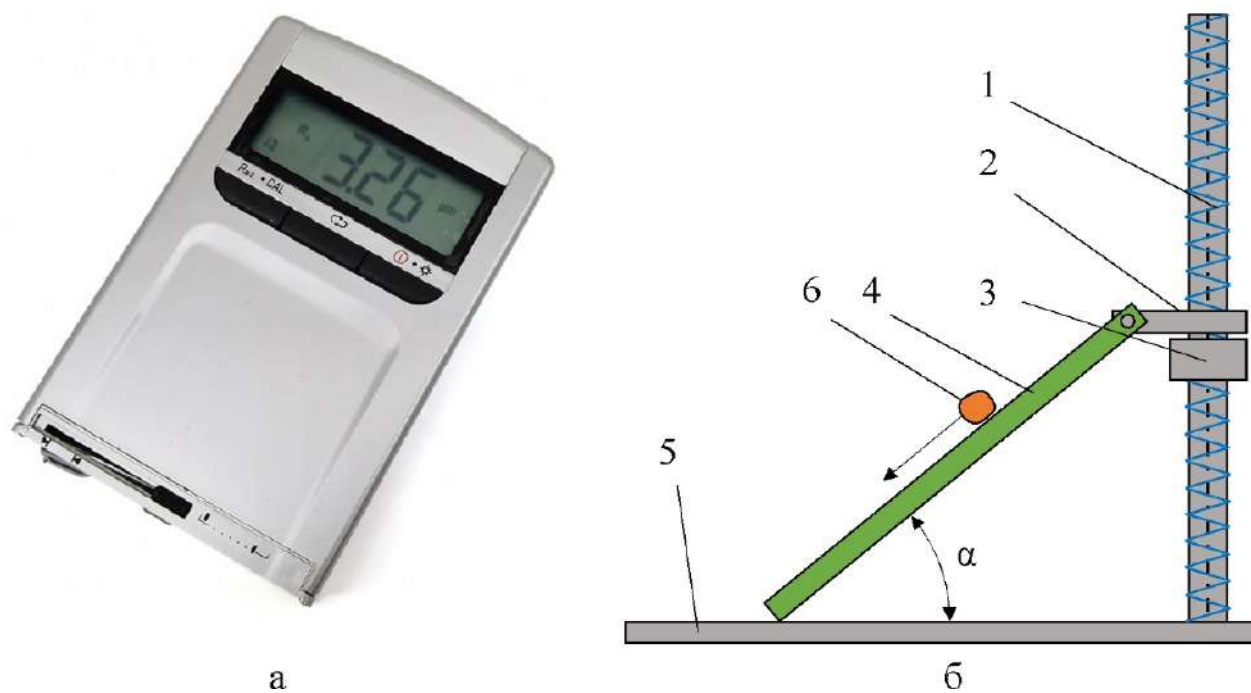
Маса 1000 насінин була визначена шляхом випадкового вибору 1000 насінин на лічильнику зерна і насіння Contador і зважування на електронних вагах METRINCO AB224 чутливістю 0,001 г (рис. 3.2).

Дійсну щільність (ρ_T) визначали методом витіснення гліцерином, шляхом заповнення кубічної ємності відомого об'єму (100 мм × 100 мм × 100 мм) і зважування на електронних вагах [136, 137, 138, 139].

Коефіцієнт тертя спокою насіння об різні поверхні f визначався для сталі, ABS пластика після обробки. Шорсткість поверхні визначали з використанням профілометра TR100 (рис. 3.3, а). Для вимірювання коефіцієнта тертя спокою один кінець поверхні тертя був прикріплений до гвинта, інший знаходився на горизонтальній поверхні (рис. 3.3, б). Насіння поміщали на поверхню тертя, один кінець якої поступово піднімався за допомогою гвинта. Тангенс кута α (рис. 3.3, б), при якому насіння починало ковзати по поверхні і визначало статичний коефіцієнт тертя спокою насіння об поверхню [140].



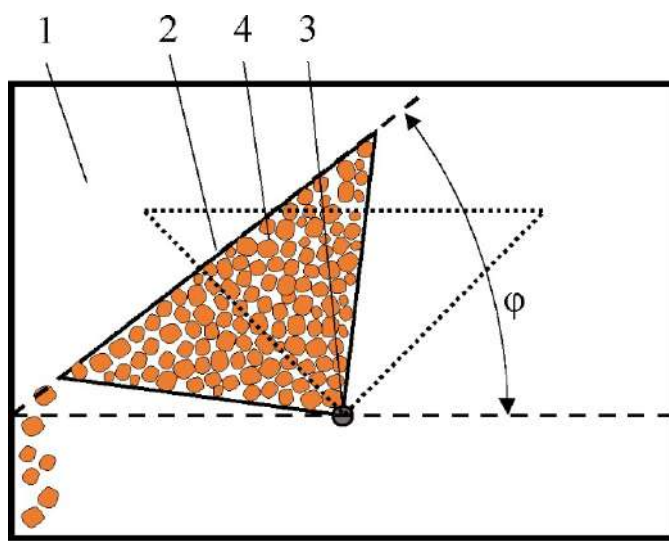
Рисунок 3.2 – Загальний вигляд лічильника зерна і насіння Contador (а) і електронних ваг METRINCO AB224 (б)



1 – гвинт; 2 – пластина з отвором; 3 – гайка; 4 – поверхня тертя;
5 – горизонтальна поверхня; 5 – насінина

Рисунок 3.3 – Загальний вигляд профілометра TR100 (а) і схема обладнання для вимірювання коефіцієнта тертя спокою насіння о різні поверхні (б)

Коефіцієнт тертя насінин між собою визначали з використанням спеціалізованого обладнання наступним чином (рис. 3.4) [141]. В ємність у формі трикутної призми (кут при вершині основи 90°), яка в початковий момент часу розміщувалася горизонтально до основи, засипали насіння до самого верху без утворення гірки. Далі обертаючи ємність у формі трикутної призми навколо вершини фіксується момент коли насіння починають скочуватися до ємності у формі прямокутного паралелепіпеда. Тангенс кута нахилу φ (рис. 3.4) і є коефіцієнт тертя насінин між собою.



а

б

1 – ємність у формі прямокутного паралелепіпеда; 2 – ємність у формі трикутної призми; 3 – вал; 4 – насіння

Рисунок 3.4 – Схема (а) і загальний вигляд (б) обладнання для вимірювання коефіцієнта тертя насінин між собою

Коефіцієнт Пуассона насіння і модуль Юнга визначали з використанням цифрового пенетрометра [142]. Схема і загальний вигляд цифрового пенетрометра приведено на рис. 3.5. Після розміщення насінини на робочому столі і запуску вимірювання, цифровий пенетрометр в автоматичному режимі здавлює насінину індентором і розраховує коефіцієнт Пуассона і модуль Юнга.

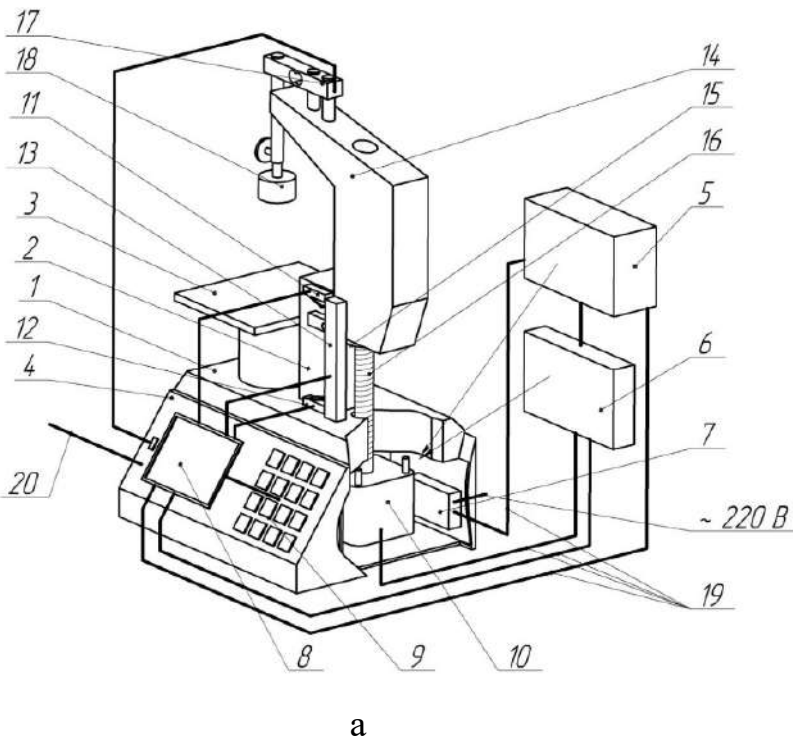
Коефіцієнт відновлювання насіння – це додатне дійсне число між 0 і 1, що дорівнює співвідношенню швидкостей до і після зіткнення насіння із поверхнею,

взятих уздовж лінії зіткнення. Насінини для яких $C_R = 1$ зіштовхуються пружно, а насінини з $C_R < 1$ зіштовхуються непружно. Для $C_R = 0$ насінини насправді «зупиняються» після удару, зовсім без відскоку [143]. У випадку, коли силами тертя можна знехтувати і насінини впали зі стану спокою на горизонтальну поверхню, коефіцієнт відновлювання насіння можна розрахувати наступним чином (рис. 3.6)

$$C_R = \sqrt{\frac{h}{H}}; \quad (3.1)$$

де h – висота відскоку, м;

H – висота падіння, м.



- а
- 1 – станина; 2 – направляюча; 3 – робочий стіл; 4 – корпус; 5 – блок живлення; 6 – драйвер крокового двигуна; 7 – розетка із вимикачем;
- 8 – блок керування з LCD-дисплеєм; 9 – клавіатура; 10 – кроковий двигун; 11 – верхній кінцевий вимикач; 12 – нижній кінцевий вимикач; 13 – лінійний змінний резистор; 14 – штатив; 15 – гайка із біговими доріжками для кульок; 16 – різбовий вал; 17 – тензодатчик; 18 – індентор; 19 – електричні проводи; 20 – USB-вихід
- б
- Рисунок 3.5 – Схема (а) і загальний вигляд (б) цифрового пенетрометра [142]

Висоти відскоку і падіння фіксували з використанням камери із максимальною частотою кадрів – 240 fps.

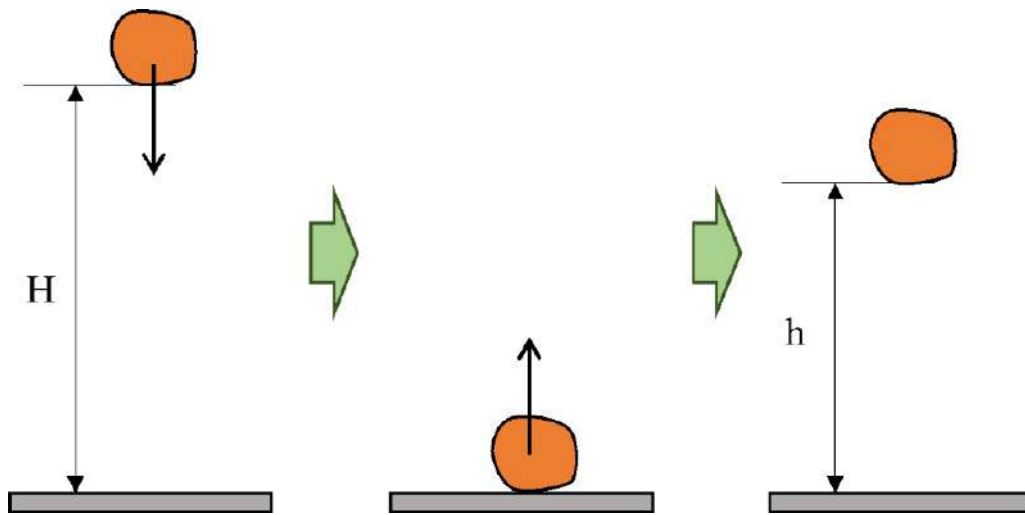
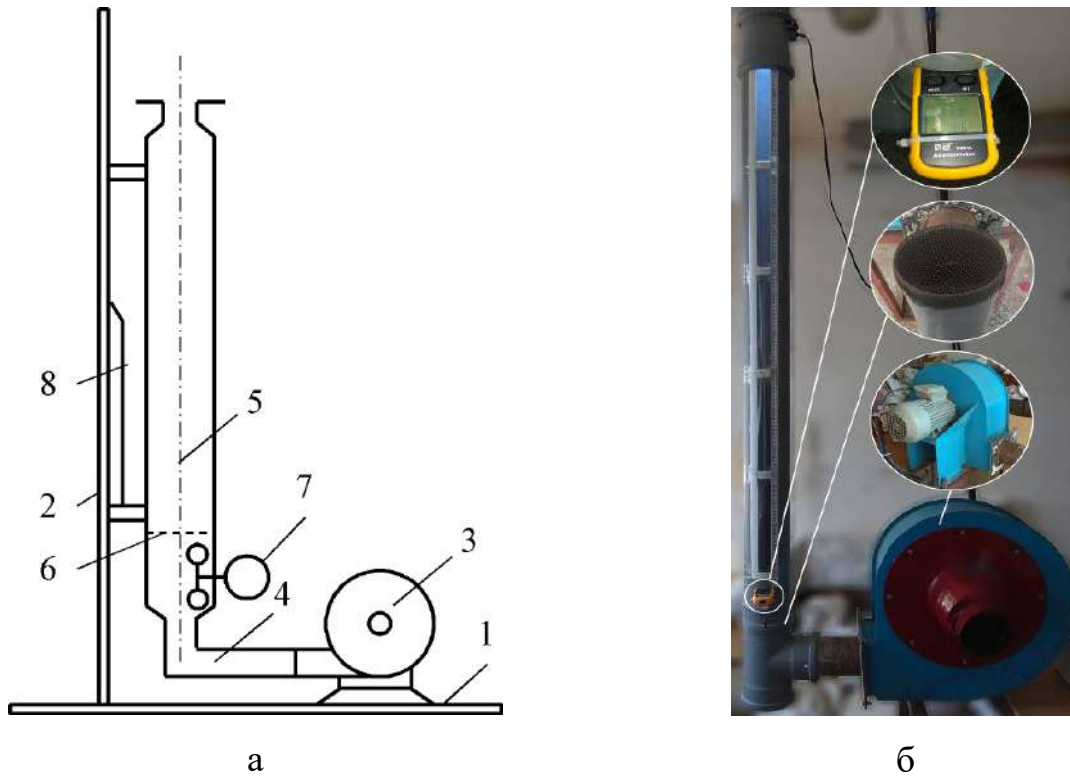


Рисунок 3.6 – Процес вимірювання висоти відскоку і падіння

Швидкість потоку повітря, при якій насінини знаходяться в підвішеному стані є швидкість витання. На випробувальному стенді (рис. 3.7), який розроблений Алієвим Е.Б. [144], були виміряні швидкості витання насіння дрібнонасінневих культур.

Випробувальний стенд складається з таких елементів: станини 1, жорстко закріпленої вертикальної стійки 2, повітродувної машини 3 з регульованою заслінкою та фітінгом 4, що з'єднує повітродувну машину і вертикальну трубу 5. У нижній частині вертикальної труби встановлена сітка 6. Для вимірювання швидкості повітря використовується анемометр GM816 7, а висота підйому частинок вимірюється за допомогою шкали 8. На сітці вертикальної труби розміщений шар насіння товщиною 3–5 мм. Після запуску електродвигуна повітродувної машини частота обертання ротора плавно збільшується. Швидкість підйому частинок визначається за їхньою висотою підйому. Коли близько 95 % частинок з шару піднімаються у внутрішньому просторі труби, фіксуються показання анемометра. В ході досліджень аналізувалися різні фракції матеріалу, які були попередньо розділені за розмірами [144].



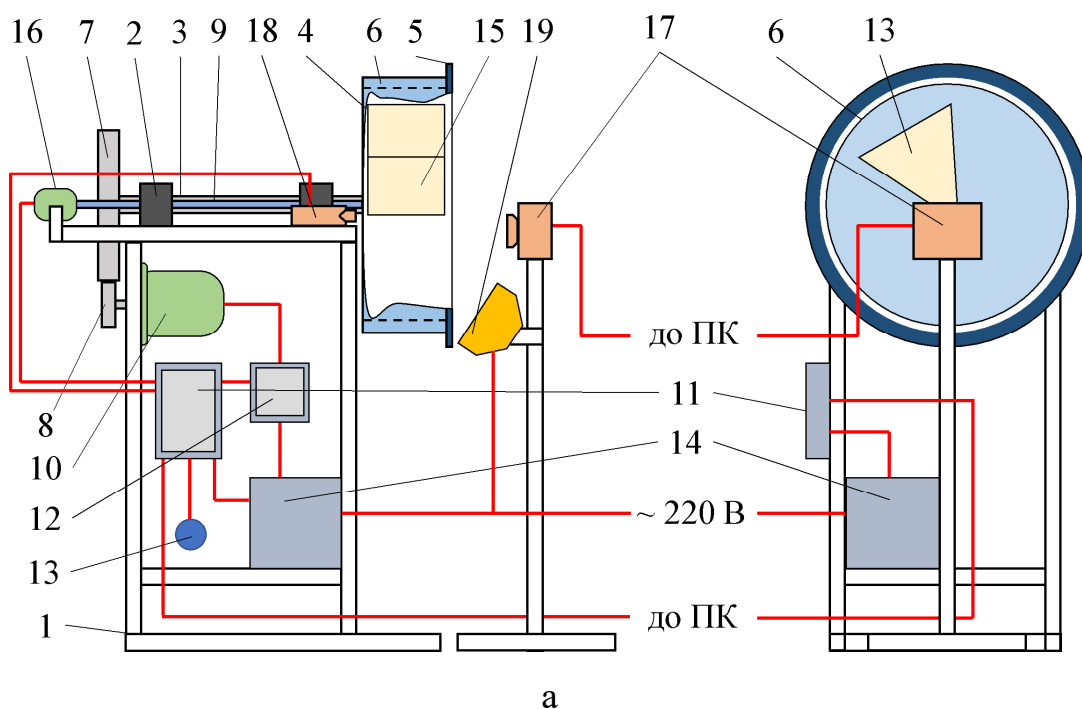
«1 – станина; 2 – стійка; 3 – повітродувна машина; 4 – фітінг;
5 – труба; 6 – сітка; 7 – анемометр GM816; 8 – шкала»

Рисунок 3.7 – Принципова схема (а) і загальний вигляд (б) стану для визначення швидкості витання часток [144]

3.3 Методика експериментальних досліджень процесу сепарації дрібнонасінневих культур на селекційно-насінницькому трієрі

Першим етапом є підготовка до експериментальних досліджень, а саме розроблення й створення селекційно-насінницького трієра. Конструктивно-технологічна схема і загальний вигляд лабораторного селекційно-насінницького трієра наведено на рис. 3.8.

Робочим органом селекційно-насінницького трієра є циліндр, який складається з пластин із чарунками. Пластини надруковані на 3D-принтері Anycubic S із ABS+ пластика. 3D-модель пластини і її загальний вигляд приведено на рис. 3.8. Слайсеризація в програмному пакеті Ultimaker Cura і процес виготовлення пластини приведено на рис. 3.9.



1 – станина; 2 – підшипники; 3 – порожній вал; 4 – циліндр; 5 – скляна кришка; 6 – пластини із чарунками; 7 – шків відомий; 8 – шків ведучий; 9 – суцільний вал; 10 – електродвигун постійного струму; 11 – плата керування Arduino UNO; 12 – драйвер електродвигуна постійного струму L298N; 13 – потенціометр; 14 – блок живлення; 15 – лоток; 16 – сервопривід; 17 – відеокамера Aspiring Repeat 4 Ultra HD 4K Dual Screen; 18 – ПЧ-сенсор; 19 – лампа холодного білого освітлення (5000–6500K)

Рисунок 3.7 – Конструктивно-технологічна схема (а) і загальний вигляд (б) селекційно-насінницького трієра

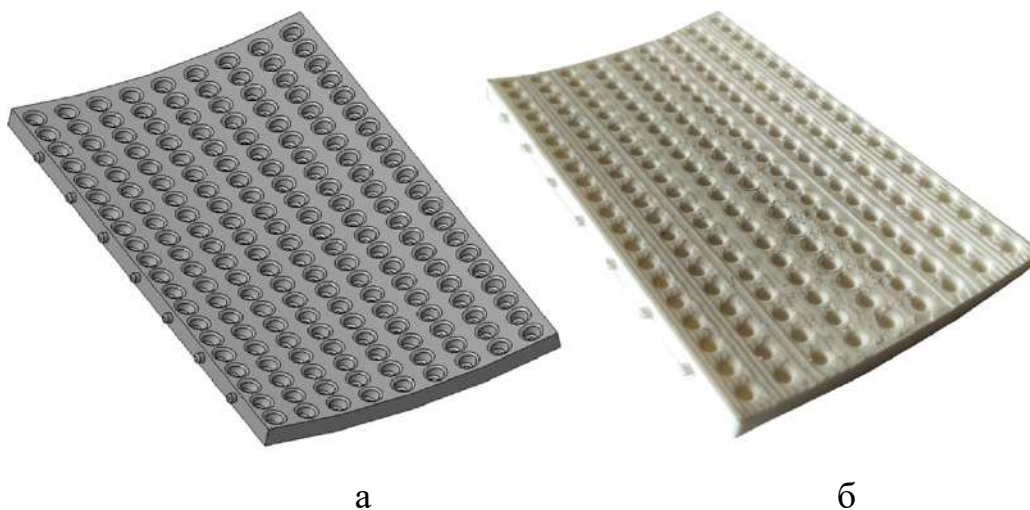


Рисунок 3.8 – 3D-модель (а) пластини із чарунками і її загальний вигляд (б)

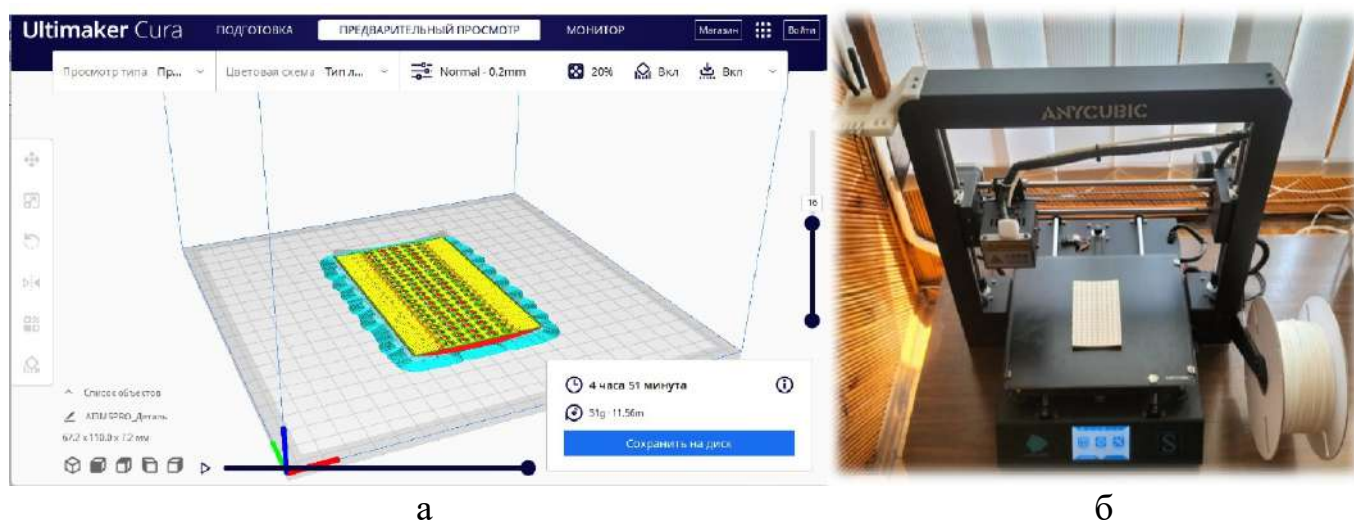


Рисунок 3.9 – Слайсеризація в програмному пакеті Ultimaker Cura (а) і процес виготовлення пластини на 3D-принтері Anycubic S (б)

Електрична схема керування селекційно-насінницьким трієром приведена на рис. 3.10.

В конструкції селекційно-насінницького трієра передбачена можливість зміни конструктивних і режимних параметрів робочого процесу:

- замінювати пластини із чарунками;
- змінювати частоту обертання циліндра – від 1 до 100 об/хв;
- змінювати напрямок обертання циліндра;
- змінювати кут обертання лотка.

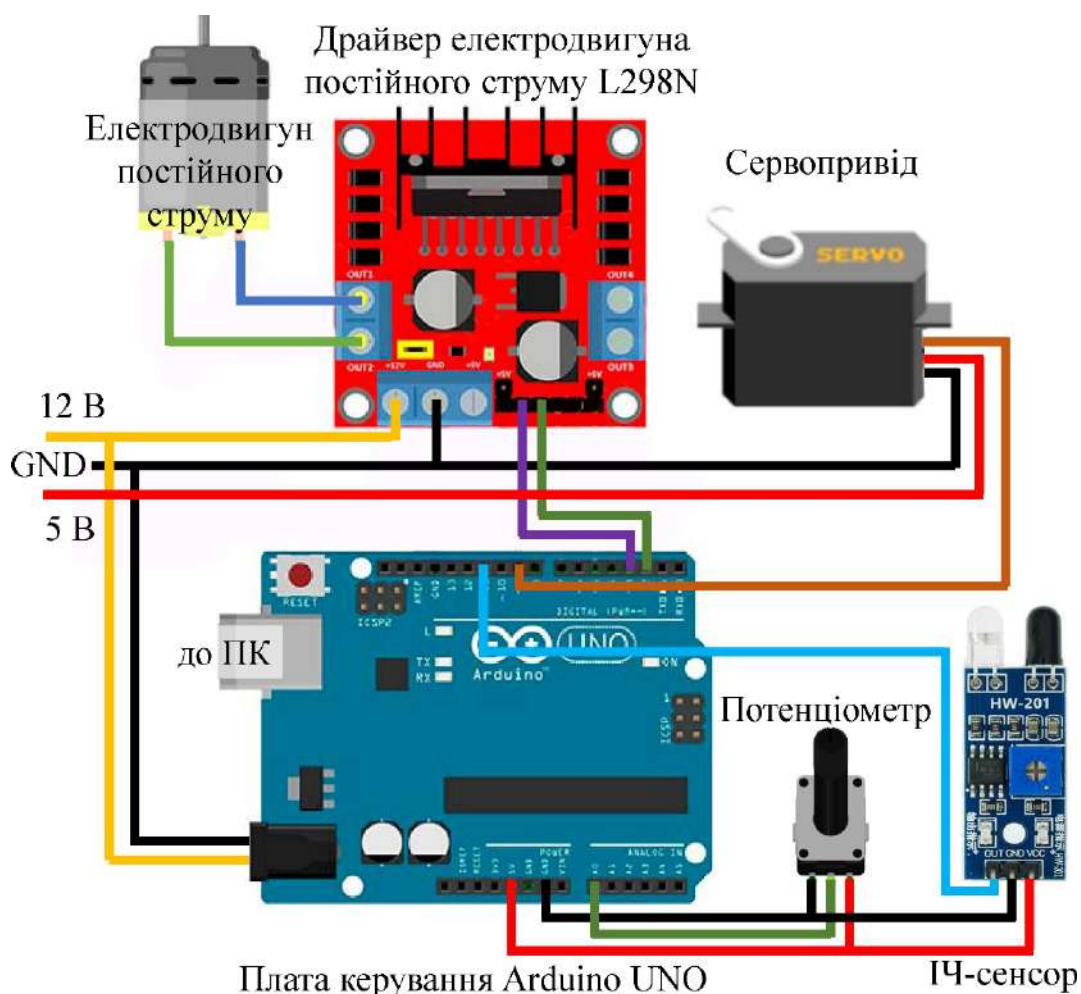


Рисунок 3.10 – Електрична схема керування селекційно-насінницьким трієром

Для зміни частоти обертання циліндра і напрямку обертання використано плату керування Arduino UNO і драйвер електродвигуна постійного струму L298N (рис. 3.10). Програме забезпечення приведено у додатку Ж. Керувати частотою і напрямом обертання циліндра можна в ручному режимі з використанням потенціометра і автоматичному з використанням монітор-порту Arduino IDE. Контроль за частотою обертання циліндра здійснено ІЧ-сенсором, який відкалібрований тахометром контактним Venetech GM8906 (рис. 3.11).

Пластини із чарунками закріплюються між собою і циліндром з використанням з'єднувальних замків, що унеможливорює випадкове зміщення пластин під час обертання циліндра.

Лоток має можливість швидко зніматися з лабораторної установки.



Рисунок 3.11 – Тахометр контактний Venetech GM8906

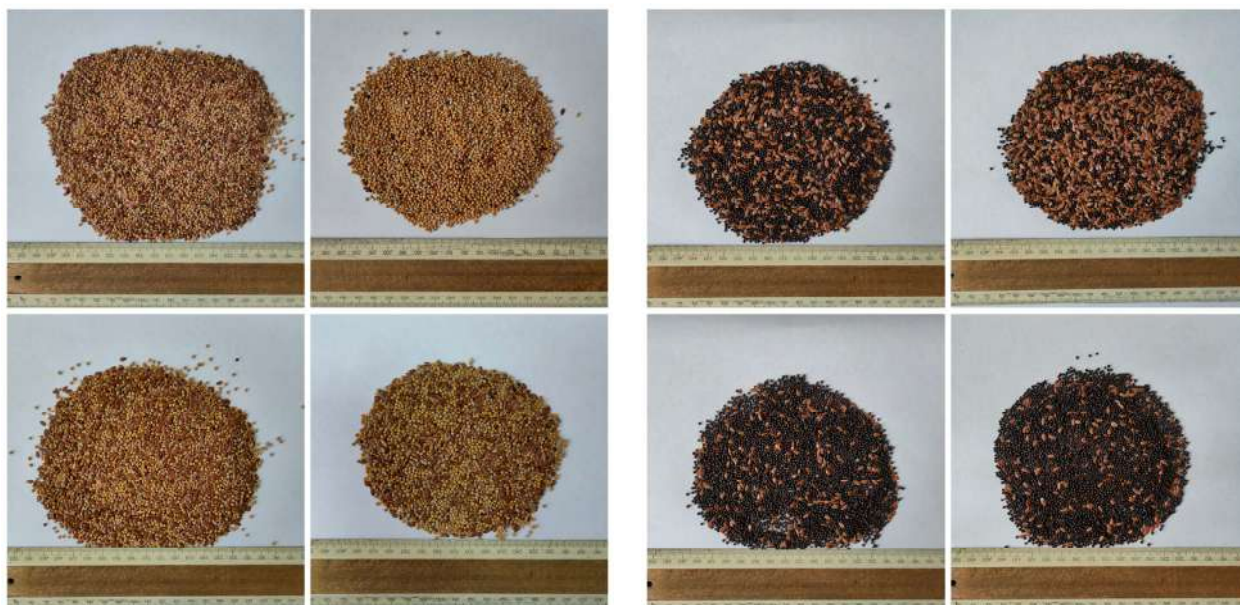
В якості об'єкту досліджень обрано насіння гірчиці сорту Запоріжанка, ріпаку сорту Атлант і рижій сорту Престиж.

Процес досліджень селекційно-насінницького трієра проводився наступним чином.

Спочатку були підготовлені наважки вихідного насіннєвого матеріалу із домішками. Імітацією домішок виступало насіння льону олійного. Маса вихідного матеріалу насіння M_0 і вміст домішок f_0 є факторами досліджень (табл. 3.1). Масу вихідного матеріалу і домішок визначали з використанням електронних ваг JD-2200-2 виробництва ТОВ «Центровес» (абсолютна похибка вимірювання 0.01 г). Фото вихідного насіннєвого матеріалу представлено на рис. 3.12.

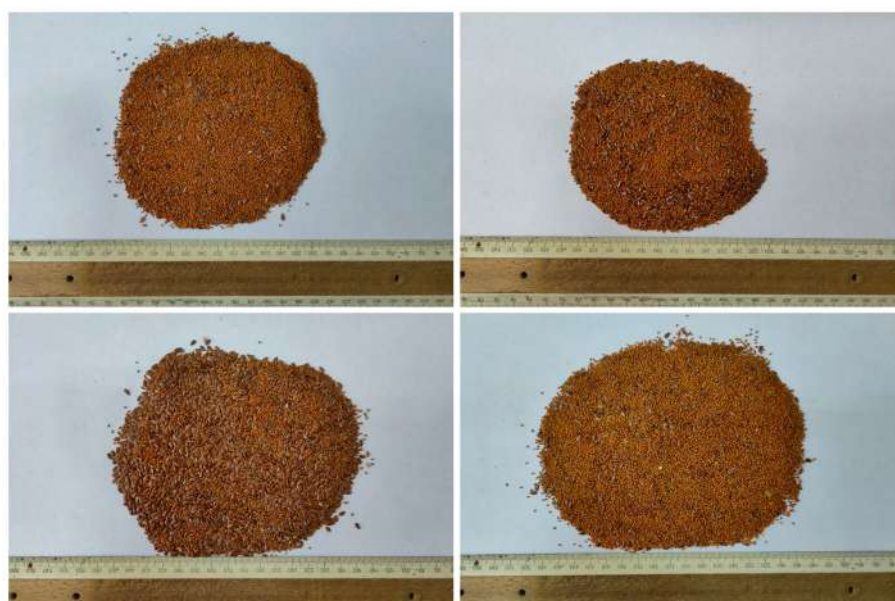
На цьому етапі досліджень лоток відсутній. Наважку вихідного насіннєвого матеріалу із домішками розміщали у циліндрі. На платі керування електродвигуном встановлювали частоту обертання валу електродвигуна і відповідно циліндра. Напрямок обертання циліндра за годинниковою стрілкою. Частота обертання циліндра є фактором досліджень (табл. 3.1).

Після запуску електродвигуна вмикається відеокамера і фіксується робота лабораторного селекційно-насінницького трієра. Процес обробки отриманого зображення наведено в розділі 3.4.



а

б



в

Рисунок 3.12 – Фото вихідного насінневого матеріалу гірчиці (а), ріпаку (б) і рижію (в)

В якості критерію оцінки процесу сепарації селекційно-насінницького трієра прийнято траєкторію польоту насінин. В результаті досліджень отриманих траєкторій (розділ 3.4) визначено максимальний θ_{\max} та мінімальний θ_{\min} кути повороту на моментах сходу першого компоненту насінневого матеріалу та останнього.

Таблиця 3.1 – Фактори експериментальних досліджень процесу сепарації дрібнонасінневих культур на селекційно-насінницькому трієрі

Фактор	Код	Рівні варіювання			Інтервал варіювання
		-1	0	+1	
Маса вихідного матеріалу насіння M_0 , кг	x_6	0,1	0,2	0,3	0,1
Частота обертання циліндра n , об/хв	x_2	34	40	46	6
Вміст домішок f_0 , %	x_7	10	30	50	20

Методика експериментальних досліджень базується на математичному плануванні експериментів [145, 146, 147, 148, 149, 150] і містить:

- визначення рівня значимих параметрів і діапазону їхнього варіювання;
- кодування параметрів варіювання у діапазоні досліджень від -1 до $+1$, при цьому

$$x_k = (x_i - x_0)/h_i, \quad (3.2)$$

де x_k – кодоване значення параметра;

x_i – поточне значення параметра в межах варіювання;

x_0 – основний рівень параметра в межах варіювання;

h_i – інтервал варіювання параметра;

- розроблення матриці планування експериментів;
- проведення експериментів на експериментальній установці;
- перевірку відтворюваності експериментів;
- визначення коефіцієнтів моделі (рівняння регресії);
- перевірку статистичної значимості коефіцієнтів моделі;
- перевірку адекватності моделі.

З метою достовірної й наочної обробки експериментальних даних, отриманих у результаті реалізації математичного планування експериментів в програмних пакетах Excel і Wolfram Cloud.

З урахуванням того, що для проведення досліджень та обробки даних використано серійні прилади й устаткування, ця похибка не перевищувала 5 %.

Матриця планування трифакторного експерименту за повнофакторним дослідом представлена в додатку Д. Загальна кількість дослідів – 27. Повторність – триразова.

Обробка результатів проведених досліджень за методом факторного планування експерименту виконується з використанням програмного пакету Wolfram Cloud. Умови однорідності дослідів припускають приблизно однаковий вплив помилок за усіма точками у плані досліджу.

Для перевірки відтворення дослідів, які виконувалися у трьохкратній повторності, використовують критерій Кохрена.

Адекватність отриманих моделей перевірялась за допомогою критерію Фішера. Значимість коефіцієнтів регресії перевіряється за допомогою визначення довірчого інтервалу для коефіцієнтів регресії.

Коефіцієнт регресії враховується значимим, якщо його абсолютне значення перевищує величину довірчого інтервалу, який визначається за t-критерієм Стюдента.

3.4 Алгоритм роботи системи розпізнавання траєкторій польоту насіння по відеозображенню

Для оцінки якості роботи селекційно-насінницького трієра отримане відео з відеокамери необхідно наочно проаналізувати і розрахувати траєкторії руху насіння під час їх польоту в циліндрі. Для цього необхідно спеціалізоване програмне забезпечення. В результаті інформаційного пошуку визначено базовий програмний код TracTrac, який розроблений Йорисом Хейманом [151, 152, 153, 154, 155]. Код є повністю відкритим і написаний на мові програмування Python з використанням відкритої бібліотеки OpenCV. Однак для наших задач необхідно удосконалити дане програмне забезпечення.

Для того, щоб програма добре працювала навіть за відносно низьких обчислювальних потужностей, було вирішено розділити її на дві стадії роботи (рис. 3.13):

– етап підготовки (офлайн обчислення), куди включено всі основні обчислення;

- етап роботи у режимі реального часу (онлайн обчислення): пошук схожого відео по кадру, пошук схожого кадру на даний у вибраному відео з урахуванням руху і побудова траєкторії об'єкта, що рухається.

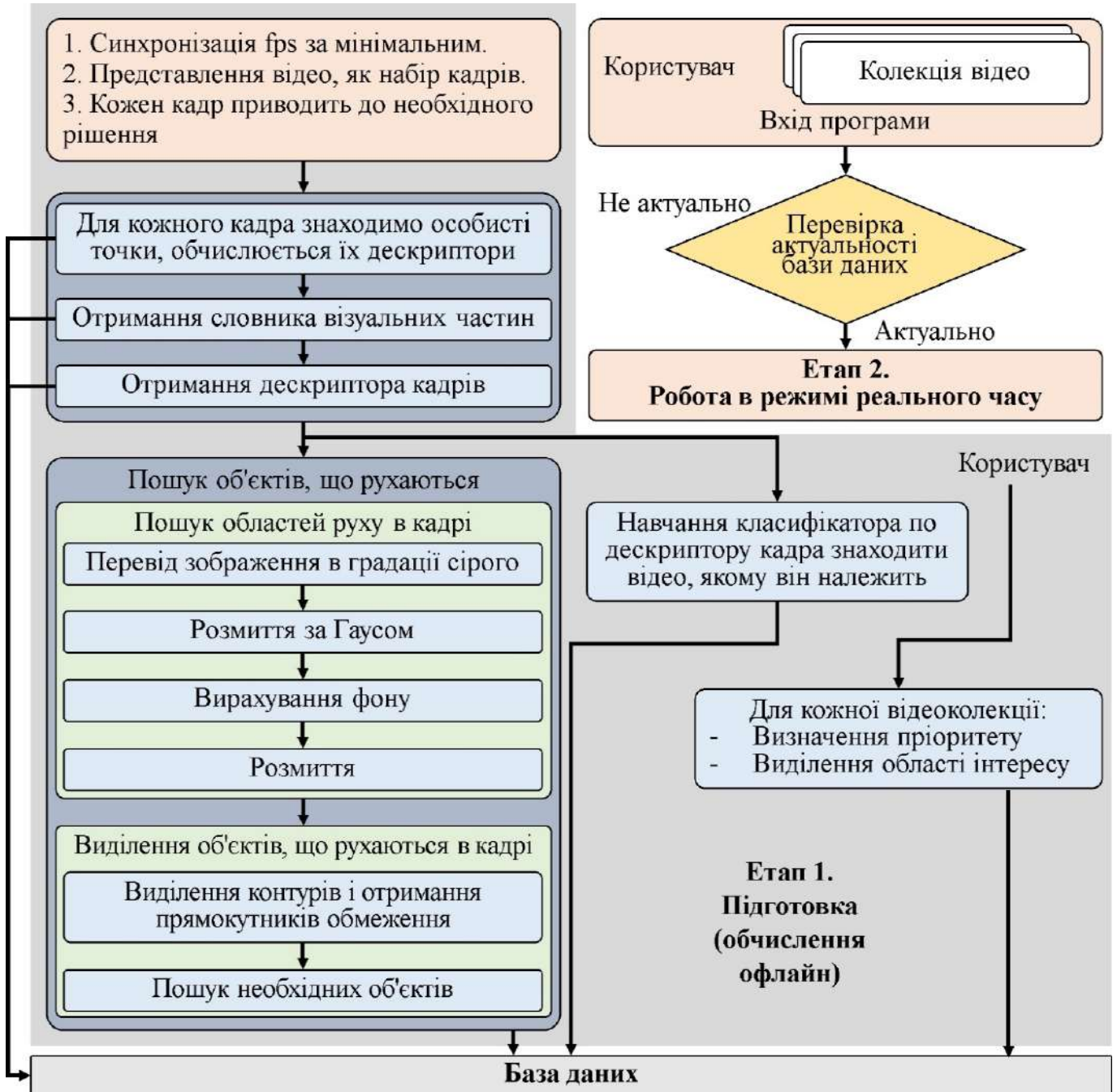


Рисунок 3.13 – Загальна схема програми обробки відео в автоматичному режимі

Алгоритми для прототипу програми обиралися таким чином, щоб максимально знизити час, що витрачається програмою на другому етапі, тобто швидкодія другого етапу вважалася пріоритетнішою, ніж швидкодія першого. При

цьому було враховано, що значне збільшення необхідного на першому етапі часу також є неприпустимим.

Найбільш широко використовуваним методом попередньої обробки зображень для їх подальшої обробки за умови, що камера статична, є вирахування фону (Background Subtraction, BS) [156, 157, 158, 159, 160]. У його основі лежить така ідея: спочатку будується модель фону B , яка буде включати статичну частину відео, тобто все, що може бути віднесено до фону, після чого вираховувати її з поточного кадру, таким чином отримуючи різницю між ними (рис. 3.14).

$$B = \{b(x, y), 0 \leq x \leq \text{width}, 0 \leq y \leq \text{height}\} \quad (2) \quad (3.3)$$

де $b(x, y) \in [0, 255]$;

width – ширина зображення;

height – висота зображення.

Кадр перед вирахуванням зазвичай переводять у градації сірого, тому кожен піксель моделі фону, який може бути представлений як зображення, буде характеризуватись інтенсивністю сірого кольору. Тоді вирахування проводиться наступним чином:

$$D(x, y) = |F(x, y) - B(x, y)| \quad (3.4)$$

де $F(x, y)$ – поточний кадр.

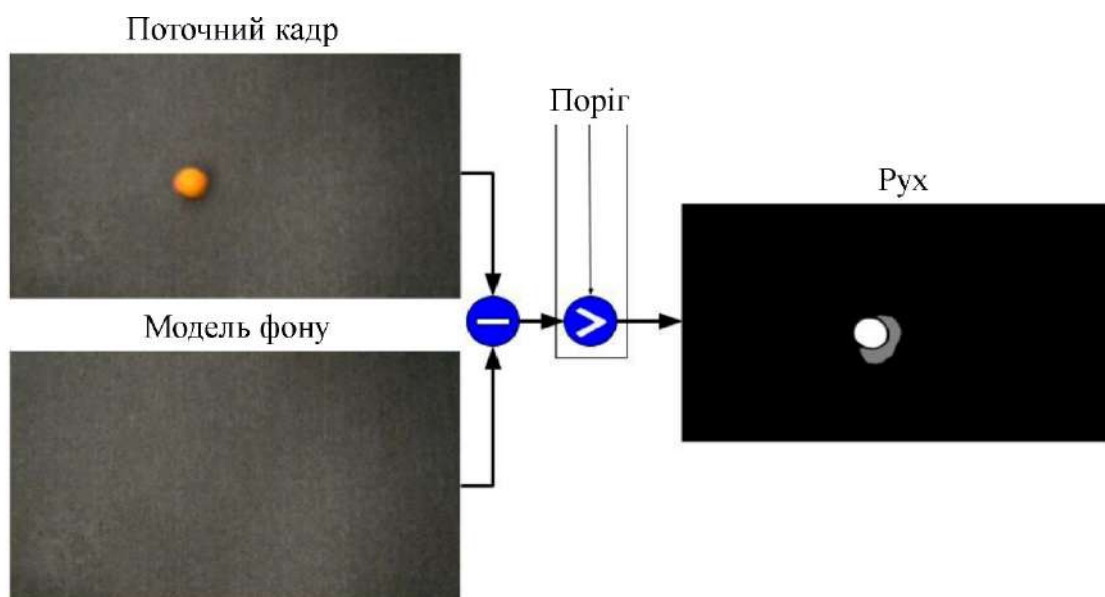


Рисунок 3.14 – Схема вирахування фону

Таким чином, після того, як буде зроблено вирахування, буде отримано зображення в градаціях сірого, кожен піксель якого характеризуватиме рух.

Найчастіше після отримання зображення, що характеризує рух, до нього застосовується бінарний поріг з метою відібрати пікселі, що належать об'єктам, що рухаються, від пікселів, які відносяться до фону (рис. 3.15). Якщо підібрати правильний поріг, у правого зображення на рис. 3.14 не залишиться сірої області, яка в даному випадку відповідає тіні об'єкта, що рухається, тобто буде отримано бінарне зображення (маску) M , білі області якого відповідають руху, а чорні – фону.

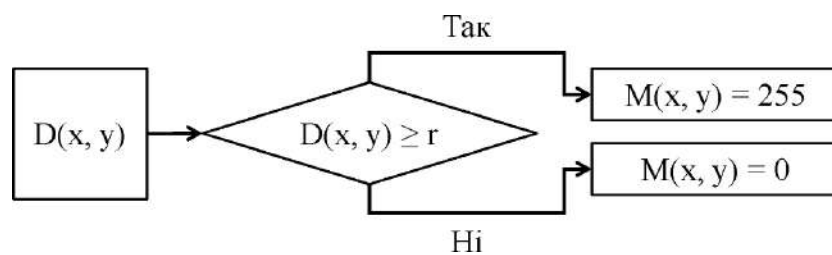


Рисунок 3.15 – Бінарний поріг

З усього вищесказаного випливає, що якість пошуку об'єктів, що рухаються в даному випадку дуже сильно залежить від того, наскільки правильною була побудована модель фону. Методи її побудови поділяються на дві групи [160]:

- Нерекурсивні. Для оновлення моделі фону для поточного кадру використовується інтенсивність пікселів кількох попередніх моделей фону та поточного кадру.

- Рекурсивні. Для оновлення моделі фону для поточного кадру використовується інтенсивність пікселів лише поточного кадру. Основна відмінність від попередньої групи – це адаптивність до фону та його подальших змін.

Не завжди просте застосування алгоритмів вирахування фону до вхідного зображення дозволяє прийнятним чином виділити об'єкти, що рухаються, і одна з основних причин – різноманітні присутні на ньому шуми. Звичайно, адаптивні алгоритми вирахування фону намагаються із цим боротися, але далеко не у всіх ситуаціях це виходить успішно, і тоді на допомогу приходять різні фільтри обробки

зображень [161]. Варто пам'ятати, що будь-які фільтри чутливі до зміни параметрів і добре підібрані параметри для однієї ситуації зовсім не обов'язково покращать результат для іншої.

Записуючі відео пристрої ніколи не бувають ідеальними, тому навіть при повній відсутності руху не будуть отримані два однакові кадри: для двох однакових, як нам здається, зображень деякі пікселі обов'язково будуть мати різні значення інтенсивності кольору. Крім того, на зображенні можливі невеликі відблиски, тому перед оновленням моделі фону зображення необхідно попередньо обробити. Одним із способів є розмиття за Гаусом (Gaussian blur). Розмиття зображень передбачає використання ядра згортки – матриці коефіцієнтів, які множаться на значення інтенсивності кольору пікселів зображення. Операцію згортки для кожного пікселя можна описати так:

- матриця згортки «прикладається» до пікселя, для якого обчислюється значення, елементом, що називається якорем (центральний елемент матриці);
- значення кожного пікселя, що потрапив під матрицю згортки, множиться на відповідну йому вагу;
- отримані значення підсумовуються.

Для обчислення нових значень крайніх пікселів зображення зазвичай спочатку розширюють до розмірів, що дозволяють «прикласти» матрицю до даних пікселів. Це відбувається за допомогою простого дублювання цих пікселів, або за допомогою дзеркального відображення пікселів щодо крайніх.

Ядро згортки, яке використовує розмиття по Гаусу, характерно тим, що при обчисленні ваг воно враховує взаємозв'язок між пікселями, ґрунтуючись на відстані: чим ближче піксель до якоря, тим більша йому відповідає вага [162]. Для обчислення ваг використовується двовимірний нормальний розподіл, який у даному випадку набуде вигляду:

$$G(x, y) = A \exp\left(\frac{-(x - \mu_x)^2}{2\sigma_x^2} + \frac{-(y - \mu_y)^2}{2\sigma_y^2}\right); \quad (3.5)$$

де $G(x, y)$ – координати елемента ядра;

σ – середньоквадратичне відхилення;

μ – центр гаусіани;

A – коефіцієнт, який обчислюється з урахуванням σ .

Координати якоря вважають рівними $(0, 0)$, а середньоквадратичні відхилення або задаються вручну, або обчислюються, виходячи з радіусу ядра. Сума ваг має дорівнювати одиниці, тому після обчислення елементів ядра згортки кожен ділиться на їх суму.

Для трекінгу об'єкта можна використовувати оптичний потік (Optical Flow), який обчислюється за допомогою алгоритму Лукаса-Канаде [163]. Обчислювати оптичний вхід всього кадру – занадто повільно, тому вхід пропонується подавати координати знайдених з допомогою ORB ключових точок, що належать області руху. Необхідно задати запізнення d_{tr} . Будемо вважати, що відстежуємо об'єкт, що рухається, якщо в області руху, одержуваної за допомогою віднімання фону, зберігається 75 % від початкової кількості відстежуваних обчисленням оптичного потоку точок.

Розглянемо роботу програми в режимі реального часу відповідно до рис. 3.13. На цьому етапі роботи для побудови траєкторії об'єкта, що рухається, використовується кортеж S , що містить n його розташування. Для будь-якого конкретного кадру F місце розташування додається до кортежу, якщо об'єкт, що рухається, був знайдений на ньому під час етапу підготовки. Якщо ж на кадрі F об'єкт на етапі підготовки не знайдено, з кортежу S видаляються k найстаріших його елементів. Для побудови траєкторії використовують метод найменших квадратів.

Робота програми в режимі реального часу організована наступним чином (рис. 3.16): якщо на поточному кадрі знайдений об'єкт, що рухається, то за умови, що $|S| = n$ будується його траєкторія. Якщо напрямок траєкторії збігається з напрямком, в якому знаходиться область інтересу (2 напрямки для осі x : вправо і вліво, 2 напрямки для осі y : вгору і вниз), відбувається її відображення.

Якщо траєкторія проходить через область інтересу, передбачається необхідна об'єкту кількість кадрів, щоб її досягти за формулою:

$$s_1 = \text{speed}/\text{dist}; \quad (3.6)$$

де dist – відстань від центру об'єкта до центру області інтересу;
 speed – швидкість об'єкта.

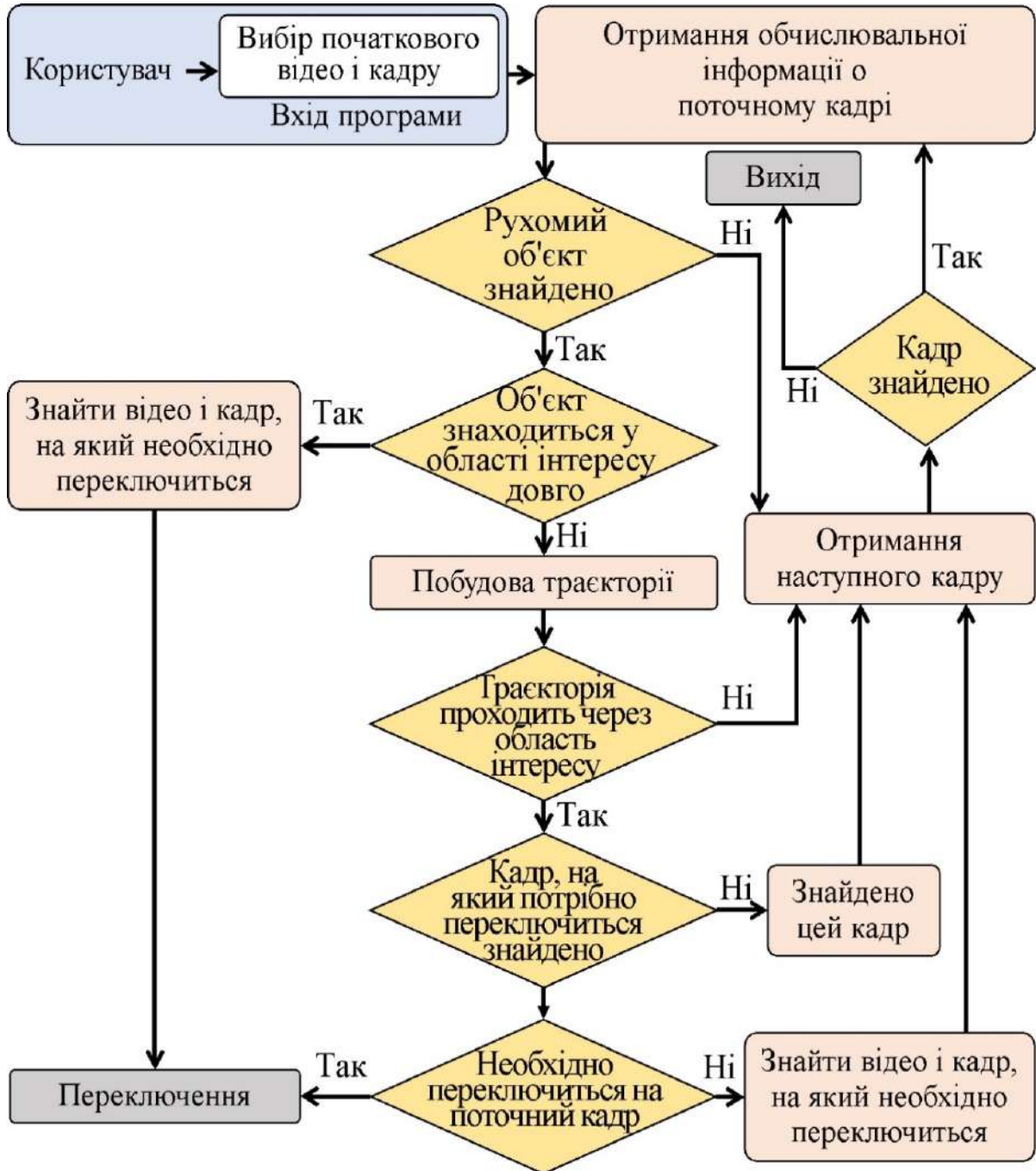


Рисунок 3.16 – Схема роботи програми в режимі реального часу

Для кожної з координат x , вона обчислюється на підставі наявних в S положень:

$$\text{speed} = |c_1 - c_2|/n; \quad (3.6)$$

де c_1, c_2 – перше і останнє розташування S .

У цьому кожному кадрі продовжує обчислюватися траєкторія. Після того, як об'єкт досягає області інтересу, відбувається перемикання, щоб уникнути перекриття (з цією ж метою можна перемикатися трохи раніше, щоб у разі, якщо перемикання було передбачено значно пізніше, ніж має статися, уникнути його повної відсутності). Воно також відбувається у разі, якщо на етапі підготовки об'єкт був знайдений на s_2 послідовних кадрах, що йдуть. Якщо s_1 було обчислено і очікується перемикання, але в якийсь момент траєкторія змінилася настільки, що вона більше не проходить через область інтересу, воно скидається, тобто перемикання не відбудеться.

Пошук кадру, на який слід перейти, відбувається таким чином:

- за допомогою класифікатора пророкуються ймовірності приналежності p_i поточного кадру кожному відео V_i , де $i \in [1, V]$ – номер відео, V – кількість відео в колекції;

- для кожного відео обчислюється число $d_i = pr_i \cdot p_i$, де pr_i – пріоритет відео; максимальне з них (не враховуючи обчислене для поточного відео) відповідатиме відео, на яке слід переключитися.

- серед цього відео знаходимо тільки ті кадри, в яких на етапі підготовки був знайдений об'єкт, що рухається, і порівнюємо їх гістограми з гістограмою поточного кадру; перехід здійснюватиметься у найближчий кадр; для обчислення відстані використовувалося ядро χ^2 .

В результаті доопрацювання коду програмний пакет TracTrac дозволив визначати траєкторію польота і швидкості насінин при їх русі в селекційно-насінницькому трієрі (рис. 3.17–3.18). За результатами досліджень це дозволило визначати максимальний θ_{\max} та мінімальний θ_{\min} кути повороту на моментах сходу першого компонента насіннєвого матеріалу та останнього. Даний діапазон кутів дозволяє встановити лоток у певному положенні для забезпечення найефективнішого збору насіннєвої суміші.

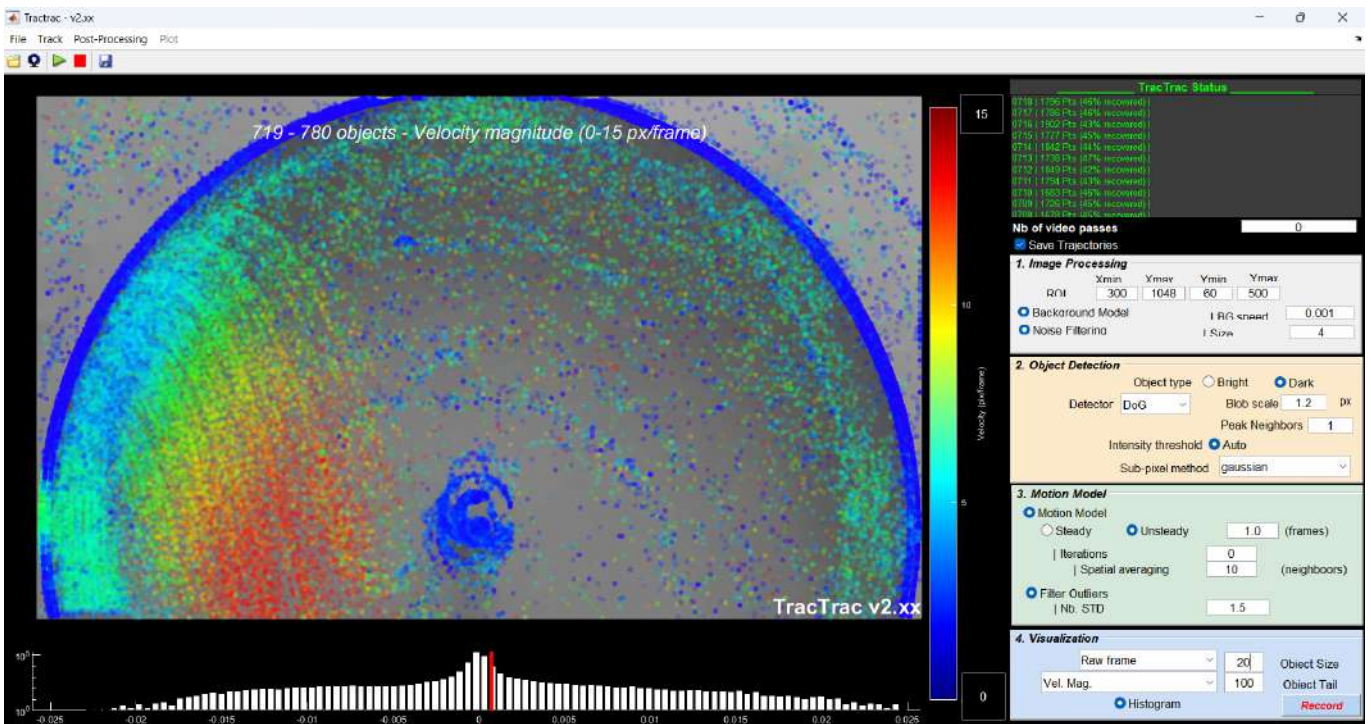


Рисунок 3.17 – Візуалізація удосконаленого програмного пакету TracTrac для визначення траєкторії польоту насінин при їх русі в селекційно-насінницькому трієрі

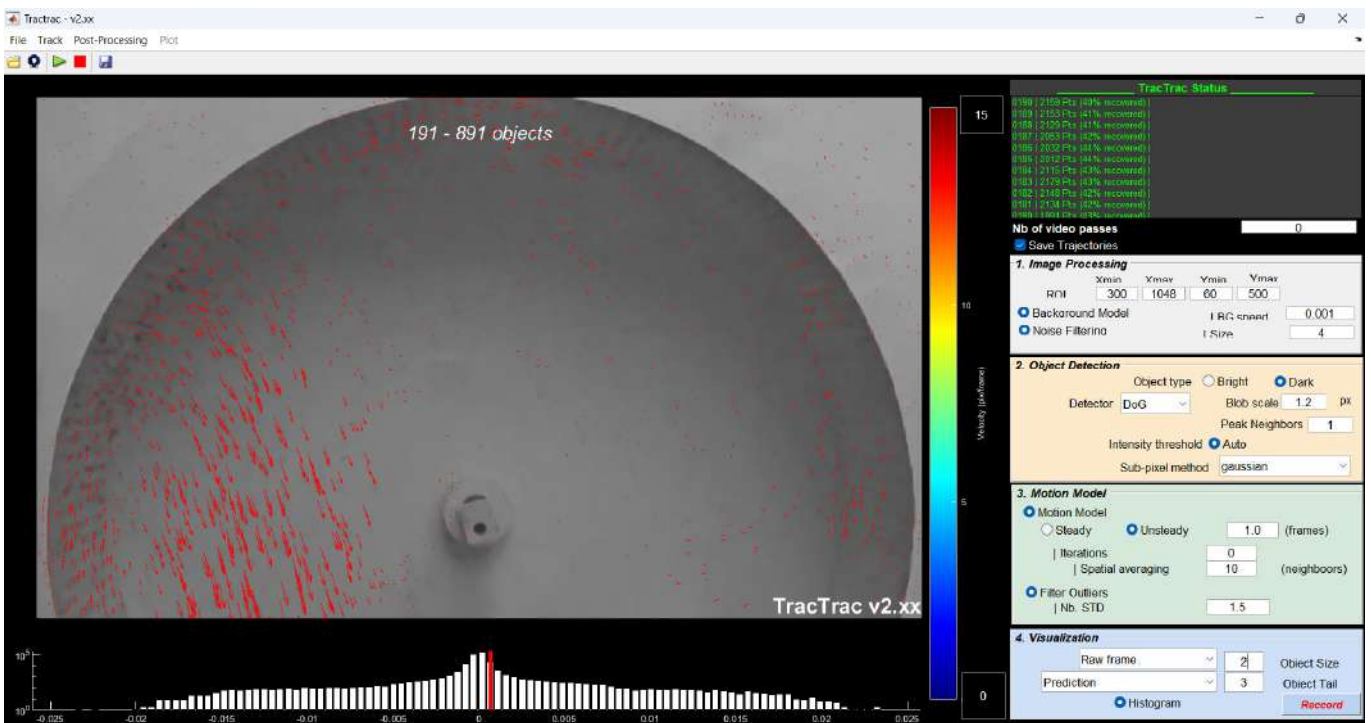


Рисунок 3.18 – Візуалізація удосконаленого програмного пакету TracTrac для визначення швидкості насінин при їх русі в селекційно-насінницькому трієрі

3.5 Методика експериментальних досліджень селекційно-насінницького трієра у складі мехатронної системи

Першим етапом є підготовка до експериментальних досліджень, а саме доопрацювання селекційно-насінницького трієра з урахуванням мехатронної системи. На персональному комп'ютері розроблена програма (розділ 3.4), яка дозволяє обробляти відеозображення та визначати траєкторію польоту насінин. На основі отриманих даних відбувається налаштування положення лотка для збору насіння в результаті керування сервоприводом. Окрім цього з персонального комп'ютера є можливість керувати електродвигуном через плату керування Arduino UNO і драйвер електродвигуна, а саме встановлювати частоту і напрямок обертання циліндру. Програмне забезпечення приведено у додатку Ж.

В якості факторів досліджень обрано: частота обертання циліндра n , тривалість обертання циліндру проти годинникової стрілкою T_L і за годинникової стрілкою T_R (табл. 3.2).

Таблиця 3.2 – Фактори експериментальних досліджень процесу сепарації дрібнонасінневих культур на селекційно-насінницькому трієрі у складі мехатронної системи

Фактор	Код	Рівні варіювання			Інтервал варіювання
		-1	0	+1	
Частота обертання циліндра n , об/хв	x_2	34	40	46	6
Тривалість обертання циліндру проти годинникової стрілкою T_L , с	x_4	10	20	30	10
Тривалість обертання циліндру за годинникової стрілкою T_R , с	x_5	2	4	6	2
Тривалість роботи T , с	x_8	60	120	180	60

Критеріями оцінки є відносна маса насінневої суміші в лотку ε^t , відносний вміст домішок в насінневій суміші лотка ε_i^t , відносний вміст насіння основної культури в насінневій суміші циліндра ε_g^c .

Продуктивність розробленого обладнання Q_1 визначали як відношення маси

насінневої суміші M_1 у лотку до тривалості роботи T .

В якості об'єкту досліджень обрано насіння рижію сорту Престиж.

Процес досліджень селекційно-насінницького трієра проводився наступним чином.

Спочатку підготовлювалися наважки вихідного насінневого матеріалу із домішками. Маса вихідного матеріалу насіння $M_0 = 300$ г і вміст домішок $f_0 = 30$ %. Далі наважку вихідного насінневого матеріалу із домішками розміщали у циліндрі. На персональному комп'ютері встановлювали значення всіх факторів досліджень (табл. 3.3) відповідно до дослідів, що проводиться.

Після запуску процесу вмикається відеокамера, визначається траєкторія руху насінин і встановлюється положення лотка в автоматичному режимі.

Методика експериментальних досліджень базується на математичному плануванні експериментів відповідно до розділу 3.2.

Матриця планування чотирьохфакторного експерименту за повнофакторним дослідом представлена в додатку Ж. Загальна кількість дослідів – 81. Повторність – триразова.

Обробка результатів проведених досліджень за методом факторного планування експерименту виконується з використанням програмного пакету Wolfram Cloud. Умови однорідності дослідів припускають приблизно однаковий вплив помилок за усіма точками у плані дослідів. Для перевірки відтворення дослідів, які виконувалися у трьохкратній повторності, використовують критерій Кохрена. Адекватність отриманих моделей перевірялась за допомогою критерію Фішера. Значимість коефіцієнтів регресії перевіряється за допомогою визначення довірчого інтервалу для коефіцієнтів регресії. Коефіцієнт регресії враховується значимим, якщо його абсолютне значення перевищує величину довірчого інтервалу, який визначається за t -критерієм Стюдента.

Після отримання математичної моделі процесу проводиться аналіз для визначення оптимальних значень факторів, які відповідають координатам оптимуму поверхні відгуку. Також досліджуються властивості цієї поверхні навколо оптимальної точки. Для пошуку оптимуму використовується метод канонічного

перетворення математичної моделі [164]. Застосування методики канонічного перетворення дозволяє перетворити модель згідно встановлених кроків. Завдяки цьому отримується форма поверхні відгуку та визначаються оптимальні координати поверхні відгуку або оптимальні значення факторів для процесу змішування [165].

Для пошуку оптимуму проводиться вирішення компромісної задачі, після того, як були визначені математичні моделі процесу за оцінювальними показниками та визначення оптимальних параметрів. Спочатку відбираються найбільш значущі фактори для кожної моделі та їх оптимальні параметри, потім з загального списку факторів обираються спільні фактори, і проводиться аналіз діапазону їх оптимальних значень.

4 РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

4.1 Результати лабораторних досліджень з визначення фізико-механічних властивостей дрібнонасіньєвих культур

В результаті лабораторних досліджень визначено фізико-механічні властивості дрібнонасіньєвих культур (гірчиці, ріпаку, рижію), які використані при чисельному моделювання процесу сепарації на селекційно-насіньєвому трієрі. Фізико-механічні властивості визначалися за методикою, яка приведена в розділі 3.1. Все насіння мало вологість $8,1 \pm 0,6$ %. Усереднені результати досліджень приведені в табл. 4.1-4.3.

Таблиця 4.1 – Фізико-механічні властивості гірчиці

Сорт	Ефективний діаметр D_p , мм		Маса 1000 насінин M_{1000} , г		Дійсна щільність ρ_p , кг/м ³		Швидкість вітання V_a , м/с	
	Сер.	+/-	Сер.	+/-	Сер.	+/-	Сер.	+/-
Мішутка	2,01	0,33	2,56	0,22	602,4	17,4	9,4	0,3
Мрія	2,42	0,41	4,86	0,35	655,3	19,0	10,4	0,4
Новинка	1,98	0,34	2,41	0,19	593,3	17,6	9,5	0,3
Пріма	2,15	0,46	3,20	0,25	615,3	22,1	9,9	0,3
Веснянка	2,62	0,62	5,81	0,43	617,3	24,2	10,9	0,4
Запоріжанка	2,73	0,66	6,43	0,54	603,9	24,4	11,2	0,5
<i>Середнє</i>	<i>2,32</i>	<i>0,47</i>	<i>4,21</i>	<i>0,33</i>	<i>614,55</i>	<i>20,81</i>	<i>10,2</i>	<i>0,4</i>

Сорт	Коефіцієнт тертя насінин між собою f_p		Коефіцієнт тертя по сталі f_{st}		Коефіцієнт тертя по ABS f_{ABS}		Коефіцієнт Пуассона μ_p		Модуль Юнга E_p , МПа	
	Сер.	+/-	Сер.	+/-	Сер.	+/-	Сер.	+/-	Сер.	+/-
Мішутка	0,40	0,06	0,28	0,02	0,34	0,02	0,21	0,03	20,1	1,2
Мрія	0,42	0,07	0,30	0,02	0,45	0,02	0,19	0,03	21,0	1,3
Новинка	0,39	0,05	0,27	0,02	0,36	0,02	0,18	0,03	19,8	1,2
Пріма	0,40	0,06	0,28	0,02	0,32	0,02	0,20	0,03	20,3	1,1
Веснянка	0,44	0,07	0,32	0,03	0,39	0,03	0,21	0,03	20,7	1,3
Запоріжанка	0,48	0,09	0,34	0,03	0,42	0,03	0,19	0,03	19,2	1,1
<i>Середнє</i>	<i>0,42</i>	<i>0,07</i>	<i>0,30</i>	<i>0,02</i>	<i>0,38</i>	<i>0,02</i>	<i>0,20</i>	<i>0,03</i>	<i>20,2</i>	<i>1,2</i>

Таблиця 4.2 – Фізико-механічні властивості ріпаку

Сорт	Ефективний діаметр D_p , мм		Маса 1000 насінин M_{1000} , г		Дійсна щільність ρ_p , кг/м ³		Швидкість вітання V_a , м/с	
	Сер.	+/-	Сер.	+/-	Сер.	+/-	Сер.	+/-
Анна	2,34	0,35	4,42	0,41	659,2	17,8	10,3	0,6
Стілуца	2,18	0,42	3,40	0,28	627,1	20,7	10,0	0,8
Атлант	2,19	0,33	3,62	0,29	658,6	17,5	9,6	0,4
Соло	2,18	0,26	3,32	0,26	612,3	13,4	9,3	0,5
Легіон	2,29	0,31	3,86	0,36	614,2	15,3	11,2	0,5
<i>Середнє</i>	<i>2,25</i>	<i>0,36</i>	<i>3,81</i>	<i>0,32</i>	<i>630,98</i>	<i>17,59</i>	<i>10,10</i>	<i>0,52</i>

Сорт	Коефіцієнт тертя насінин між собою f_p		Коефіцієнт тертя по сталі f_{st}		Коефіцієнт тертя по ABS f_{ABS}		Коефіцієнт Пуассона μ_p		Модуль Юнга E_p , МПа	
	Сер.	+/-	Сер.	+/-	Сер.	+/-	Сер.	+/-	Сер.	+/-
Анна	0,43	0,08	0,36	0,02	0,39	0,03	0,22	0,05	23,1	1,2
Стілуца	0,50	0,07	0,32	0,04	0,47	0,03	0,22	0,04	23,0	1,4
Атлант	0,44	0,05	0,31	0,03	0,40	0,03	0,21	0,05	23,0	1,2
Соло	0,47	0,07	0,31	0,02	0,38	0,04	0,23	0,05	20,8	1,1
Легіон	0,49	0,09	0,39	0,04	0,47	0,03	0,25	0,03	22,2	1,8
<i>Середнє</i>	<i>0,46</i>	<i>0,07</i>	<i>0,33</i>	<i>0,03</i>	<i>0,42</i>	<i>0,03</i>	<i>0,22</i>	<i>0,04</i>	<i>22,05</i>	<i>1,33</i>

Таблиця 4.3 – Фізико-механічні властивості рижюю

Сорт	Ефективний діаметр D_p , мм		Маса 1000 насінин M_{1000} , г		Дійсна щільність ρ_p , кг/м ³		Швидкість вітання V_a , м/с	
	Сер.	+/-	Сер.	+/-	Сер.	+/-	Сер.	+/-
Зевс	1,51	0,88	1,12	0,18	621,6	59,2	10,0	0,6
Престиж	1,88	1,06	2,12	0,32	609,7	56,3	10,0	0,7
Міраж	1,78	1,02	1,81	0,28	613,3	57,3	10,4	0,4
Славутич	1,53	0,92	1,18	0,21	629,5	62,6	10,4	0,4
<i>Середнє</i>	<i>1,87</i>	<i>0,76</i>	<i>2,32</i>	<i>0,28</i>	<i>619,87</i>	<i>44,71</i>	<i>10,35</i>	<i>0,53</i>

Сорт	Коефіцієнт тертя насінин між собою f_p		Коефіцієнт тертя по сталі f_{st}		Коефіцієнт тертя по ABS f_{ABS}		Коефіцієнт Пуассона μ_p		Модуль Юнга E_p , МПа	
	Сер.	+/-	Сер.	+/-	Сер.	+/-	Сер.	+/-	Сер.	+/-
Зевс	0,47	0,07	0,38	0,02	0,51	0,04	0,21	0,05	22,5	1,4
Престиж	0,47	0,07	0,34	0,02	0,36	0,03	0,20	0,05	21,5	1,4
Міраж	0,46	0,06	0,34	0,04	0,37	0,03	0,21	0,03	21,9	1,6
Славутич	0,51	0,07	0,34	0,03	0,47	0,05	0,22	0,05	23,8	1,6
<i>Середнє</i>	<i>0,48</i>	<i>0,07</i>	<i>0,35</i>	<i>0,03</i>	<i>0,43</i>	<i>0,04</i>	<i>0,22</i>	<i>0,04</i>	<i>22,32</i>	<i>1,50</i>

Представлені результати досліджень свідчать про рівність значень параметрів насіння в межах культури (для різних сортів). Тому при чисельному моделюванні (розділ 2.2) використані усереднені значення фізико-механічних властивостей насіння досліджуваних культурних рослин.

4.2 Результати експериментальних досліджень процесу сепарації дрібнонасінневих культур на селекційно-насінницькому трієрі

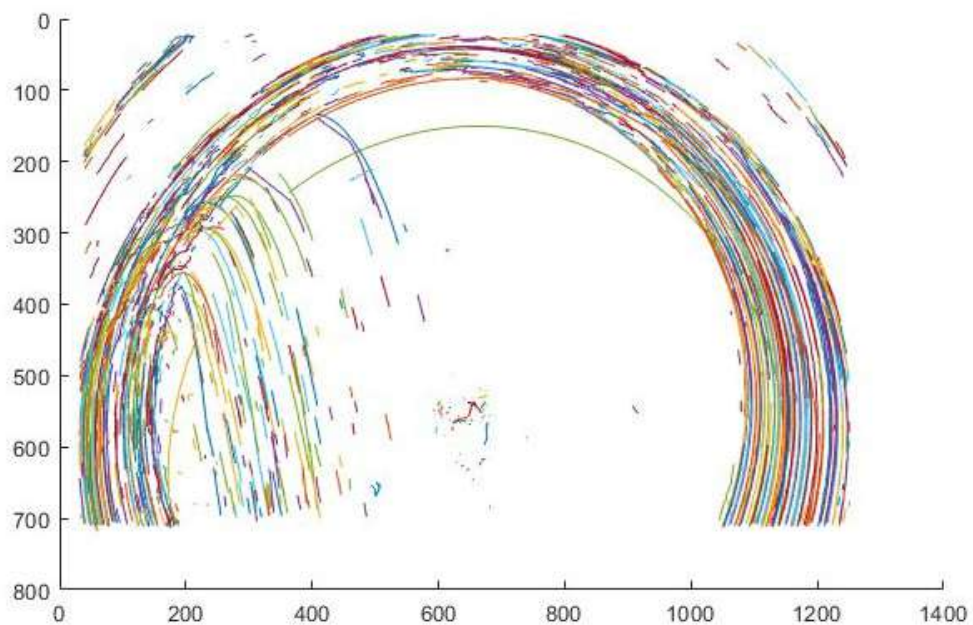
В результаті експериментальних досліджень з використанням програмного пакету TracTrac отримані вихідні файли із даними і візуалізації траєкторій і швидкостей польоту компонентів насінневої суміші по кожному досліді для рижю, гірчиці і ріпаку (рис. 4.1, додаток Д).

Рисунок 4.1 (а) демонструє траєкторії польоту компонентів насінневої суміші. Видно, що насіння з чарунок відривається раніше і рухаються за параболічною траєкторією. Місце відриву насіння і визначає кути виходу їх з чарунки циліндра трієра θ_{\min} і θ_{\max} . Таким чином можна скласти матрицю результатів досліджень, яка наведена в додатку Д.

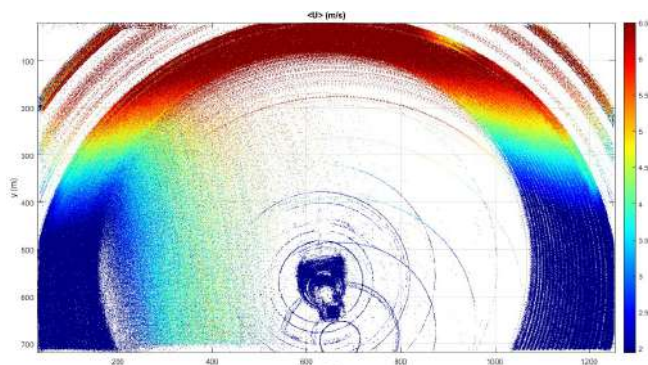
Скалярні розподіли на рис. 4.1 (б, в) демонструють значення проєкцій швидкостей польоту компонентів в області досліджень. U – проєкція швидкості компонентів вздовж вісі Ox , V – проєкція швидкості компонентів вздовж вісі Oy .

Графіки на рис. 4.1 (г, д) показують залежність проєкцій швидкостей польоту компонентів U і V від координати x та y . В цілому представлені залежності несуть лише ознайомчий характер і використовуються лише для загального опису процесу роботи селекційно-насінницького трієра.

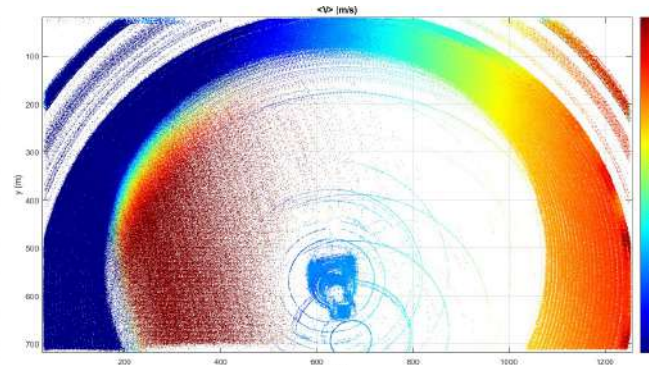
Однак, використовуючи залежність $V(y)$ можна перевірити розраховані з рис. 4.1 (а) координати сходження компонентів насінневої суміші з чарунок циліндра трієра. Це дозволяє перевірити отримані дані і у разі їх неточності доповнити їх.



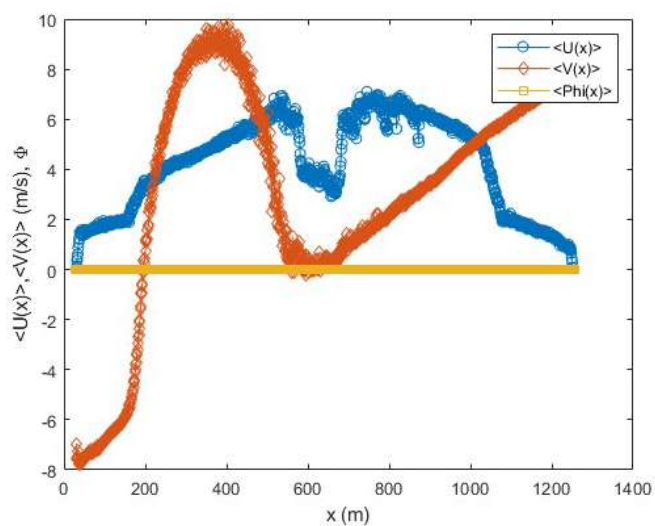
а



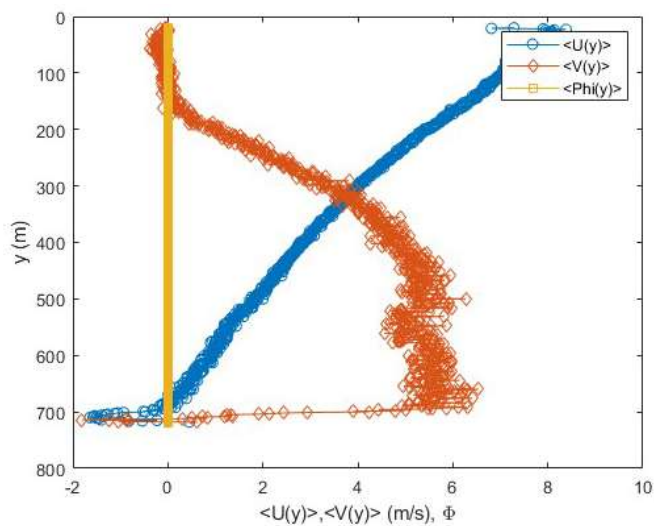
б



в



г



д

Рисунок 4.1 – Візуалізація траєкторій (а) і швидкостей (б-д) польоту компонентів насінневої суміші для 1 досліді для гірчиці

Обробка отриманих даних (додаток Д) в програмному пакеті Wolfram Cloud дозволила отримати рівняння регресії другого порядку (додаток Е), яке показує залежність значень мінімального θ_{\min} і максимального θ_{\max} значень кутів виходу насіння з чарунки циліндра трієра від факторів досліджень в закодованому вигляді:

$$\begin{aligned} \theta_{\min} = & 0,22845 + 0,0823248 x_6 + 0,0164483 x_6^2 + 0,0977746 x_2 + \\ & + 0,0235159 x_6 x_2 + 0,00354167 x_6^2 - 0,00520833 x_7 - \\ & - 0,0003125 x_6 x_7 - 0,003125 x_2 x_7 + 0,00270833 x_7^2, \end{aligned} \quad (4.1)$$

$$\begin{aligned} \theta_{\max} = & 0,785097 + 0,0401852 x_6 - 0,00104938 x_6^2 + 0,207715 x_2 + \\ & + 0,00627778 x_6 x_2 - 0,000493827 x_2^2 - 0,0045679 x_7 - \\ & - 1,14146 \cdot 10^{-16} x_6 x_7 + 0,00222222 x_2 x_7 + 0,0000617284 x_7^2. \end{aligned} \quad (4.2)$$

Статистична обробка рівнянь (4.1) і (4.2) приведена в таблицях 4.4 і 4.5 відповідно.

Порівнюючи розрахований критерій Стьюдента із табличним $t_{0,05}(27) = 2,05$ проведемо відхилення незначущих коефіцієнтів регресії. В результаті перетворимо рівняння (4.1) і (4.2):

$$\begin{aligned} \theta_{\min} = & 0,22845 + 0,0823248 x_6 + 0,0164483 x_6^2 + 0,0977746 x_2 + \\ & + 0,0235159 x_6 x_2 - 0,00520833 x_7 - 0,003125 x_2 x_7, \end{aligned} \quad (4.3)$$

$$\theta_{\max} = 0,785097 + 0,0401852 x_6 + 0,20771 x_2 + 0,006277 x_6 x_2 - 0,004567 x_7. \quad (4.4)$$

Таблиця 4.4 – Результати статистичної обробки рівняння (4.1)

Коефіцієнт	Значення	Помилка	Критерій Стьюдента	Ймовірність
a_{00}	0,22845	0,00228006	100,195	$5,23448 \cdot 10^{-25}$
a_{60}	0,0823248	0,00105546	77,9987	$3,66357 \cdot 10^{-23}$
a_{20}	0,0977746	0,00105546	92,6366	$1,98117 \cdot 10^{-24}$
a_{70}	-0,00520833	0,00105546	-4,93464	0,000125665
a_{62}	0,0235159	0,00129267	18,1917	$1,3999 \cdot 10^{-12}$
a_{63}	-0,0003125	0,00129267	-0,241747	0,811868
a_{27}	-0,003125	0,00129267	-2,41747	0,027149
a_{66}	0,0164483	0,00182812	8,99739	$7,11546 \cdot 10^{-8}$
a_{22}	0,00354167	0,00182812	1,93733	0,0695023
a_{77}	0,00270833	0,00182812	1,48149	0,156775

Таблиця 4.5 – Результати статистичної обробки рівняння (4.2)

Коефіцієнт	Значення	Помилка	Критерій Стьюдента	Ймовірність
a ₀₀	0,785097	0,00212863	368,828	1,2668·10 ⁻³⁴
a ₆₀	0,0401852	0,000985363	40,7821	2,11641·10 ⁻¹⁸
a ₂₀	0,207715	0,000985363	210,801	1,706·10 ⁻³⁰
a ₇₀	-0,0045679	0,000985363	-4,63575	0,000236365
a ₆₂	0,00627778	0,00120682	5,20192	0,0000719783
a ₆₃	-1,1414·10 ⁻¹⁶	0,00120682	-9,45841·10 ⁻¹⁴	1
a ₂₇	0,00222222	0,00120682	1,84139	0,0830827
a ₆₆	-0,00104938	0,0017067	-0,614861	0,546789
a ₂₂	-0,000493827	0,0017067	-0,289346	0,775815
a ₇₇	0,0000617284	0,0017067	0,0361683	0,971569

Статистичний аналіз рівнянь (4.3) і (4.4) в досліджуваному діапазоні варіювання показав, що коефіцієнт кореляції Пірсона складає 0,89 і 0,88 відповідно. В свою чергу критерій Фішера складає $F_{(4.3)} = 2,12 < F_T = 2,49$ і $F_{(4.4)} = 2,21 < F_T = 2,49$ відповідно. Це підтверджує адекватність отриманих моделей.

Підставляючи в рівняння (4.1)–(4.2) замість x_i вирази для факторів досліджень в явному вигляді отримуємо залежність значень мінімального θ_{\min} і максимального θ_{\max} значень кутів виходу насіння з чарунки циліндра трієра від факторів досліджень в розкодованому вигляді:

$$\theta_{\min} = -0,0747216 + 0,00078125 f_0 - 1,40241 M_0 + 1,64483 M_0^2 + 0,00136801 n - 0,0000260417 f_0 n + 0,0391932 M_0 n + 0,0000983796 n^2, \quad (4.5)$$

$$\theta_{\max} = -0,589487 - 0,000228395 f_0 - 0,0166667 M_0 + 0,0325266 n + 0,010463 M_0 n. \quad (4.6)$$

Графічна інтерпретація залежностей (4.5)–(4.6) представлена на рис. 4.2–4.4 при фіксованих значеннях факторів досліджень.

На рисунку 4.2 показана залежність мінімального θ_{\min} і максимального θ_{\max} значень кутів виходу насіння з чарунки циліндра трієра від маси вихідного матеріалу насіння M_0 та частоти обертання циліндра трієра n . З рисунку видно, що значення мінімального кута θ_{\min} незначно збільшується при збільшенні маси вихідного матеріалу, а також збільшується при збільшенні частоти обертання

циліндра трієра n . Значення максимального кута θ_{\max} незначно збільшується від маси вихідного матеріалу насіння M_0 , але значно збільшується зі збільшенням частоти обертання циліндра трієра.

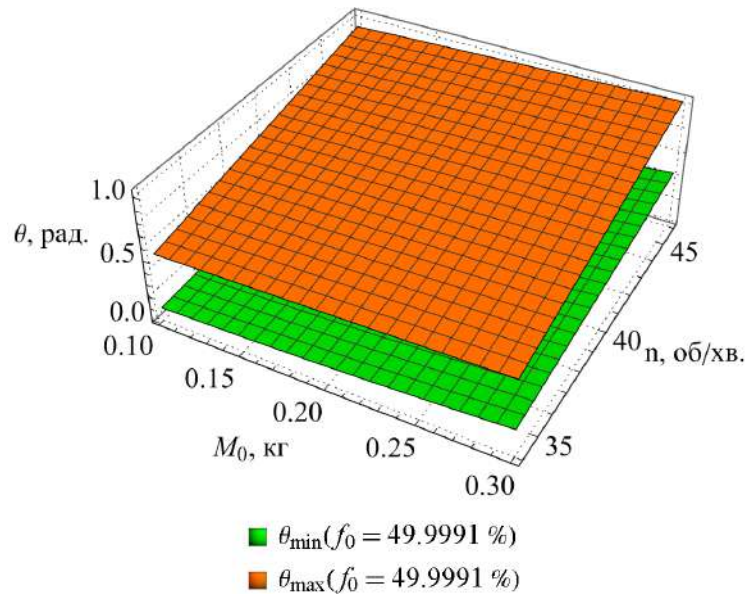


Рисунок 4.2 – Залежність мінімального θ_{\min} і максимального θ_{\max} значень кутів виходу насіння з чарунки циліндра трієра від маси вихідного матеріалу насіння M_0 та частоти обертання циліндра трієра n

На рисунку 4.3 показана залежність значень мінімального θ_{\min} і максимального θ_{\max} значень кутів виходу насіння з чарунки циліндра трієра від маси вихідного матеріалу насіння M_0 та вмісту домішок f_0 . З рисунку видно, що значення мінімального кута θ_{\min} збільшується зі збільшенням маси вихідного матеріалу насінневої суміші. Максимальне значення кута θ_{\max} незначно збільшується зі збільшенням маси вихідного матеріалу насінневої суміші M_0 . Збільшення вмісту домішок не впливає на мінімальне θ_{\min} і максимальне θ_{\max} значення кутів виходу насіння з чарунки циліндра трієра.

На рисунку 4.4 показана залежність значень мінімального θ_{\min} і максимального θ_{\max} значень кутів виходу насіння з чарунки циліндра трієра від частоти обертання циліндра трієра n та вмісту домішок f_0 . З рисунку видно, що зі збільшенням частоти обертання n зростають значення мінімального θ_{\min} і максимального θ_{\max} кутів виходу насіння з чарунки циліндра трієра. Збільшення вмісту домішок не впливає на

мінімальне θ_{\min} і максимальне θ_{\max} значення кутів виходу насіння з чарунки циліндра трієра.

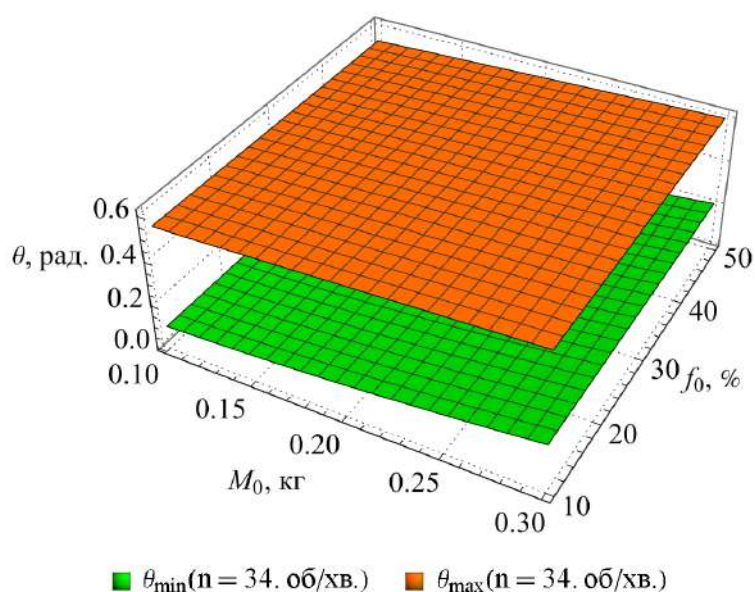


Рисунок 4.3 – Залежність значень мінімального θ_{\min} і максимального θ_{\max} значень кутів виходу насіння з чарунки циліндра трієра від маси вихідного матеріалу насіння M_0 та вмісту домішок f_0

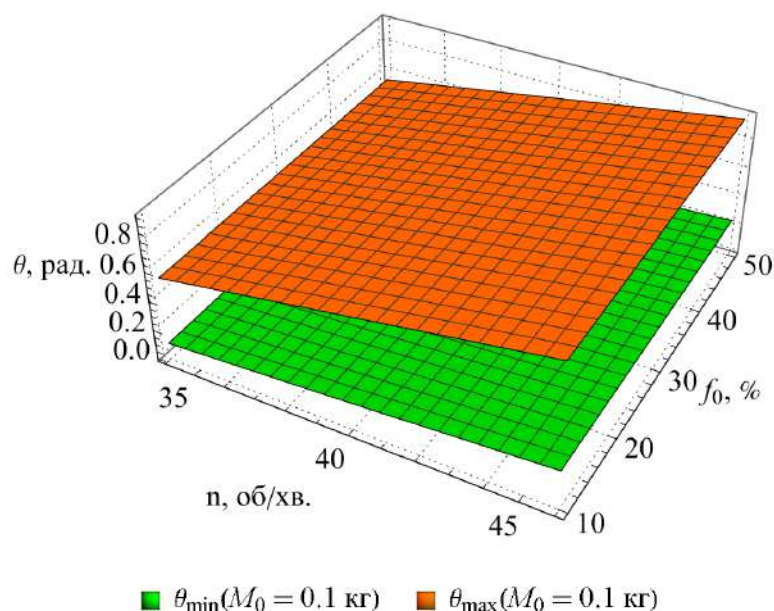


Рисунок 4.4 – Залежність значень мінімального θ_{\min} і максимального θ_{\max} значень кутів виходу насіння з чарунки циліндра трієра від частоти обертання циліндра трієра n та вмісту домішок f_0

Отримані залежності (4.5) і (4.6) увійшли до програмного забезпечення системи керування мехатронної системи, яке представлено в додатку Ж.

4.3 Результати експериментальних досліджень селекційно-насінницького трієра у складі мехатронної системи

Обробка отриманих даних (додаток И) в програмному пакеті Wolfram Cloud дозволила отримати рівняння регресії другого порядку (додаток К), яке показує залежність маси насінневої суміші в лотку ε^t від факторів досліджень в закодованому вигляді:

$$\begin{aligned} \varepsilon^t = & 69,6642 + 12,5581 x_2 - 5,28308 x_2^2 - 1,55207 x_4 + 5,56306 x_2 x_4 - \\ & - 3,528 x_4^2 - 0,600715 x_5 + 1,64435 x_2 x_5 - 0,868665 x_4 x_5 - 0,265036 x_5^2 + \\ & + 7,08441 x_8 - 4,52685 x_2 x_8 - 3,29005 x_4 x_8 - 0,866906 x_5 x_8 - 3,44633 x_8^2. \end{aligned} \quad (4.7)$$

Статистична обробка рівняння (4.7) приведена в таблиці 4.6.

Таблиця 4.6 – Результати статистичної обробки рівняння (4.7)

Коефіцієнт	Значення	Помилка	Критерій Стьюдента	Ймовірність
a ₀₀	69,6642	2,12028	32,8562	1,26114·10 ⁻⁴²
a ₂₀	12,5581	0,865599	14,508	3,2942·10 ⁻²²
a ₄₀	-1,55207	0,865599	-1,79306	0,0775449
a ₅₀	-0,600715	0,865599	-0,693987	0,490126
a ₈₀	7,08441	0,865599	8,1844	1,23844·10 ⁻¹¹
a ₁₄	5,56306	1,06014	5,24748	1,75598·10 ⁻⁶
a ₂₅	1,64435	1,06014	1,55107	0,125666
a ₂₆	-4,52685	1,06014	-4,27006	0,0000639879
a ₄₅	-0,868665	1,06014	-0,819389	0,415514
a ₄₈	-3,29005	1,06014	-3,10342	0,0028159
a ₅₈	-0,866906	1,06014	-0,817729	0,416454
a ₂₂	-5,28308	1,49926	-3,52379	0,000778038
a ₄₄	-3,528	1,49926	-2,35316	0,0216036
a ₅₅	-0,265036	1,49926	-0,176778	0,860224
a ₈₈	-3,44633	1,49926	-2,29869	0,0246974

Порівнюючи розрахований критерій Стюдента із табличним $t_{0,05}(81) = 1,98$ проведемо відхилення незначущих коефіцієнтів регресії. В результаті перетворимо рівняння (4.7):

$$\begin{aligned} \epsilon^t = & 69,6642 + 12,5581 x_2 - 5,28308 x_2^2 + 5,56306 x_2 x_4 - 3,528 x_4^2 + \\ & + 7,08441 x_8 - 4,52685 x_2 x_8 - 3,29005 x_4 x_8 - 3,44633 x_8^2. \end{aligned} \quad (4.8)$$

Статистичний аналіз рівняння (4.8) в досліджуваному діапазоні варіювання показав, що коефіцієнт кореляції Пірсона складає 0,91. В свою чергу критерій Фішера складає $F = 2,22 < F_T = 2,49$. Це підтверджує адекватність отриманих моделей.

Підставляючи в рівняння (4.8) замість x_i вирази для факторів досліджень в явному вигляді отримуємо залежність масу насінневої суміші в лотку ϵ^t від факторів досліджень в розкодованому вигляді:

$$\begin{aligned} \epsilon^t = & -290,27 + 13,4878 n - 0,146752 n^2 + 0,960481 T - 0,0125746 n T - \\ & - 0,000957314 T^2 - 1,63949 T_L + 0,0927176 n T_L - 0,00548342 t T_L - \\ & - 0.03528 T_L^2. \end{aligned} \quad (4.9)$$

Оптимальні значення факторів при умові максимуму масу насінневої суміші в лотку ($\epsilon^t = 79,1$ %) складають $n = 46$ об/хв, $T_L = 27,9$ с, $T = 119,6$ с. Графічна інтерпретація залежності (4.9) представлена на рис. 4.5 при фіксованих значеннях факторів досліджень.

На рисунку 4.5 показана залежність відносної маси насінневої суміші в лотку ϵ^t від факторів досліджень. З рисунку видно, що зі збільшенням частоти обертання циліндра трієра n зростає значення відносної маси насінневої суміші в лотку ϵ^t . Загальний час обертання цилінда T також впливає на значення відносної маси насінневої суміші в лотку ϵ^t . Зі збільшенням загального часу обертання цилінда T збільшується відносна маса насінневої суміші в лотку. Час обертання циліндра за годинниковою стрілкою T_R не впливає на значення відносної маси насінневої суміші в лотку ϵ^t . Час обертання циліндра проти годинникової стрілки T_L впливає на значення відносної маси насінневої суміші в лотку ϵ^t . Зі зростанням часу обертання циліндра проти годинникової стрілки T_L зростає значення відносної маси насінневої суміші в лотку ϵ^t .

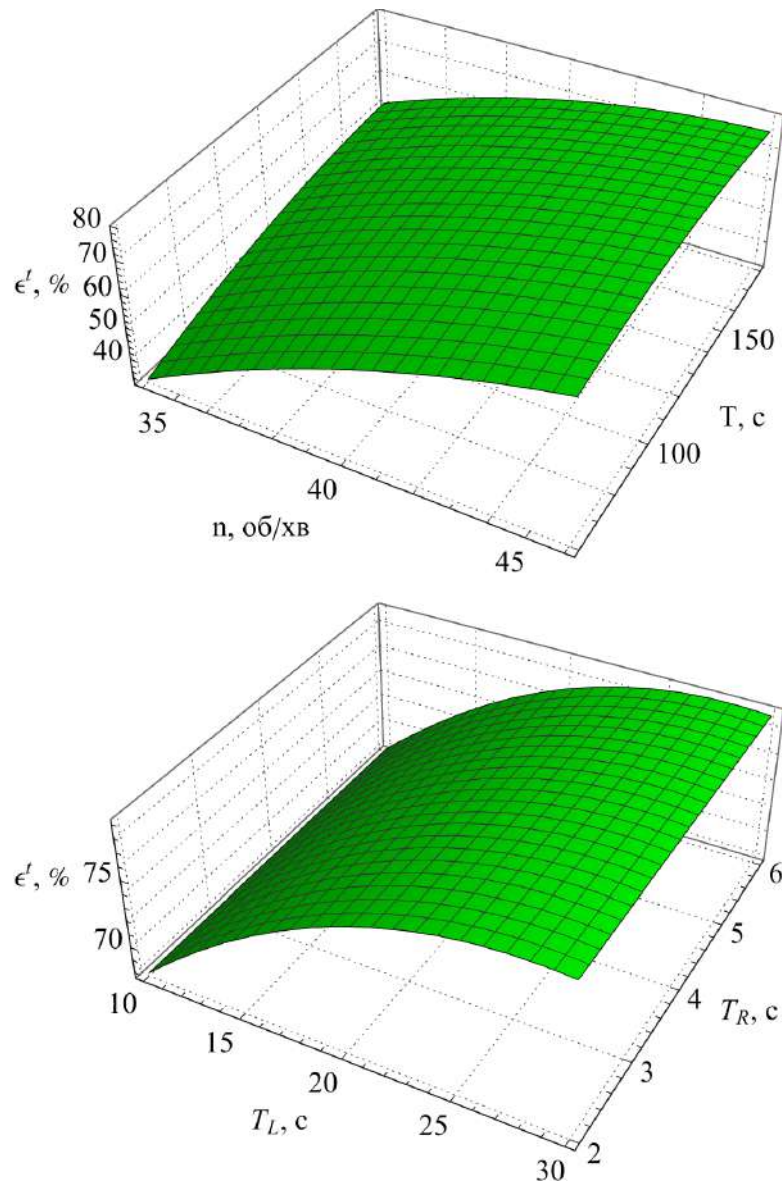


Рисунок 4.5 – Залежність відносної маси насінневої суміші в лотку ϵ^t від факторів досліджень

Обробка отриманих даних (додаток И) в програмному пакеті Wolfram Cloud дозволила отримати рівняння регресії другого порядку (додаток К), яке показує залежність відносного вмісту домішок в насінневій суміші лотка ϵ_i^t від факторів досліджень в закодованому вигляді:

$$\begin{aligned}
 \epsilon_i^t = & 2,88339 + 2,44641 x_2 + 1,33738 x_2^2 + 1,23616 x_4 + 0,562469 x_2 x_4 + \\
 & + 0,390527 x_4^2 - 0,244117 x_5 - 0,121836 x_2 x_5 + 0,204025 x_4 x_5 + \\
 & + 0,137934 x_5^2 + 1,17004 x_8 + 0,772825 x_2 x_8 + 0,142835 x_4 x_8 + \\
 & + 0,0281743 x_5 x_8 + 0,223601 x_8^2.
 \end{aligned}
 \tag{4.10}$$

Статистична обробка рівняння (4.10) приведена в таблиці 4.7.

Таблиця 4.7 – Результати статистичної обробки рівняння (4.10)

Коефіцієнт	Значення	Помилка	Критерій Стьюдента	Ймовірність
a ₀₀	2,88339	0,281552	10,2411	2,87578·10 ⁻¹⁵
a ₂₀	2,44641	0,114943	21,2837	2,9086·10 ⁻³¹
a ₄₀	1,23616	0,114943	10,7546	3,75246·10 ⁻¹⁶
a ₅₀	-0,244117	0,114943	-2,12381	0,0374384
a ₈₀	1,17004	0,114943	10,1793	3,68117·10 ⁻¹⁵
a ₁₄	0,562469	0,140776	3,9955	0,000165131
a ₂₅	-0,121836	0,140776	-0,865458	0,389923
a ₂₆	0,772825	0,140776	5,48976	6,90047·10 ⁻⁷
a ₄₅	0,204025	0,140776	1,44929	0,151991
a ₄₈	0,142835	0,140776	1,01463	0,313988
a ₅₈	0,0281743	0,140776	0,200136	0,84199
a ₂₂	1,33738	0,199087	6,71755	5,13362·10 ⁻⁹
a ₄₄	0,390527	0,199087	1,96159	0,0540308
a ₅₅	0,137934	0,199087	0,692834	0,490844
a ₈₈	0,223601	0,199087	1,12313	0,265451

Порівнюючи розрахований критерій Стьюдента із табличним $t_{0,05}(81) = 1,98$ проведемо відхилення незначущих коефіцієнтів регресії. В результаті перетворимо рівняння (4.10):

$$\begin{aligned} \varepsilon_i^t = & 2,88339 + 2,44641 x_2 + 1,33738 x_2^2 + 1,23616 x_4 + 0,562469 x_2 x_4 + \\ & + 0,390527 x_4^2 - 0,244117 x_5 + 1,17004 x_8 + 0,772825 x_2 x_8. \end{aligned} \quad (4.11)$$

Статистичний аналіз рівняння (4.11) в досліджуваному діапазоні варіювання показав, що коефіцієнт кореляції Пірсона складає 0,95. В свою чергу критерій Фішера складає $F = 1,89 < F_T = 2,49$. Це підтверджує адекватність отриманих моделей.

Підставляючи в рівняння (4.11) замість x_i вирази для факторів досліджень в явному вигляді отримуємо залежність відносного вмісту домішок в насінній суміші лотка ε_i^t від факторів досліджень в розкодованому вигляді:

$$\varepsilon_i^t = 61,0548 - 3,00931 n + 0,0371494 n^2 - 0,0663689 t + 0,00214674 n t - \quad (4.12)$$

$$- 0,407574 T_L + 0,00937449 n T_L + 0,00390527 T_L^2 - 0,122058 T_R.$$

Оптимальні значення факторів при умові мінімуму відносного вмісту домішок в насіннєвій суміші лотка ($\varepsilon_i^t = 0,39\%$) складають $n = 37,5$ об/хв, $T_L = 10$ с, $T_R = 6$ с, $T = 60$ с. Графічна інтерпретація залежності (4.12) представлена на рис. 4.6 при фіксованих значеннях факторів досліджень.

На рисунку 4.6 показана залежність відносного вмісту домішок в насіннєвій суміші лотка ε_i^t від факторів досліджень. З рисунку видно, що на відносний вміст домішок в насіннєвій суміші лотка ε_i^t впливають частота обертання циліндра n , загальний час обертання циліндра T , та час обертання циліндра за i проти годинникової стрілки. Відносний вміст домішок в насіннєвій суміші лотка ε_i^t зростає зі збільшенням частоти обертання циліндра з 37 об/хв. і до 46 об/хв.. Зі збільшенням загального часу обертання циліндра збільшується відносний вміст домішок в насіннєвій суміші лотка ε_i^t . Зі збільшенням часу обертання циліндра проти годинникової стрілки T_L також збільшується відносний вміст домішок в насіннєвій суміші лотка ε_i^t . Зі збільшенням часу обертання циліндра за годинниковою стрілкою T_R відносний вміст домішок в насіннєвій суміші лотка ε_i^t зменшується.

Обробка отриманих даних (додаток И) в програмному пакеті Wolfram Cloud дозволила отримати рівняння регресії другого порядку (додаток К), яке показує залежність відносного вмісту насіння основної культури в насіннєвій суміші циліндра ε_g^c від факторів досліджень в закодованому вигляді:

$$\begin{aligned} \varepsilon_g^c = & 10,9551 - 15,086 x_2 + 8,32717 x_2^2 + 3,41796 x_4 - 5,61816 x_2 x_4 + \\ & + 4,29072 x_4^2 + 0,558969 x_5 - 2,25443 x_2 x_5 + 0,269892 x_4 x_5 + \\ & + 0,980935 x_5^2 - 8,43999 x_8 + 5,5339 x_2 x_8 + 6,28291 x_4 x_8 + \\ & + 1,22708 x_5 x_8 + 4,73759 x_8^2. \end{aligned} \quad (4.13)$$

Статистична обробка рівняння (4.13) приведена в таблиці 4.8.

Порівнюючи розрахований критерій Стюдента із табличним $t_{0,05}(81) = 1,98$ проведемо відхилення незначущих коефіцієнтів регресії. В результаті перетворимо рівняння (4.10):

$$\varepsilon_g^c = 10,9551 - 15,086 x_2 + 8,32717 x_2^2 + 3,41796 x_4 - 5,61816 x_2 x_4 + \quad (4.14)$$

$$+ 4,29072 x_4^2 - 8,43999 x_8 + 5,5339 x_2 x_8 + 6,28291 x_4 x_8 + 4,73759 x_8^2.$$

Таблиця 4.8 – Результати статистичної обробки рівняння (4.13)

Коефіцієнт	Значення	Помилка	Критерій Стьюдента	Ймовірність
a ₀₀	10,9551	2,38838	4,58686	0,0000206558
a ₂₀	-15,086	0,975051	-15,472	1,22092·10 ⁻²³
a ₄₀	3,41796	0,975051	3,50541	0,000824645
a ₅₀	0,558969	0,975051	0,573272	0,568409
a ₈₀	-8,43999	0,975051	-8,65594	1,78053·10 ⁻¹²
a ₁₄	-5,61816	1,19419	-4,70458	0,0000134457
a ₂₅	-2,25443	1,19419	-1,88783	0,063446
a ₂₆	5,5339	1,19419	4,63402	0,0000174014
a ₄₅	0,269892	1,19419	0,226005	0,821896
a ₄₈	6,28291	1,19419	5,26124	1,66594·10 ⁻⁶
a ₅₈	1,22708	1,19419	1,02754	0,307918
a ₂₂	8,32717	1,68884	4,93071	5,82024·10 ⁻⁶
a ₄₄	4,29072	1,68884	2,54063	0,0134249
a ₅₅	0,980935	1,68884	0,580834	0,563331
a ₈₈	4,73759	1,68884	2,80524	0,00659943

Статистичний аналіз рівнянн (4.14) в досліджуваному діапазоні варіювання показав, що коефіцієнт кореляції Пірсона складає 0,91. В свою чергу критерій Фішера складає $F = 1,75 < F_T = 2,49$. Це підтверджує адекватність отриманих моделей.

Підставляючи в рівняння (4.14) замість x_i вирази для факторів досліджень в явному вигляді отримуємо залежність відносного вмісту насіння основної культури в насіннєвій суміші циліндра ε_g^c від факторів досліджень в розкодованому вигляді:

$$\begin{aligned} \varepsilon_g^c = & 551,791 - 20,9911 n + 0,23131 n^2 - 1,28081 T + 0,0153719 n T + \\ & + 0,001316 T^2 + 1,11437 T_L - 0,093636 n T_L + 0,0104715 T T_L + 0,0429072 T_L^2. \end{aligned} \quad (4.15)$$

Оптимальні значення факторів при умові мінімуму відносного вмісту насіння основної культури в насіннєвій суміші циліндра ($\varepsilon_g^c = 1,37\%$) складають $n = 41,5$ об/хв, $T_L = 10,3$ с, $T = 180$ с. Графічна інтерпретація залежності (4.15) представлена на рис. 4.7 при фіксованих значеннях факторів досліджень.

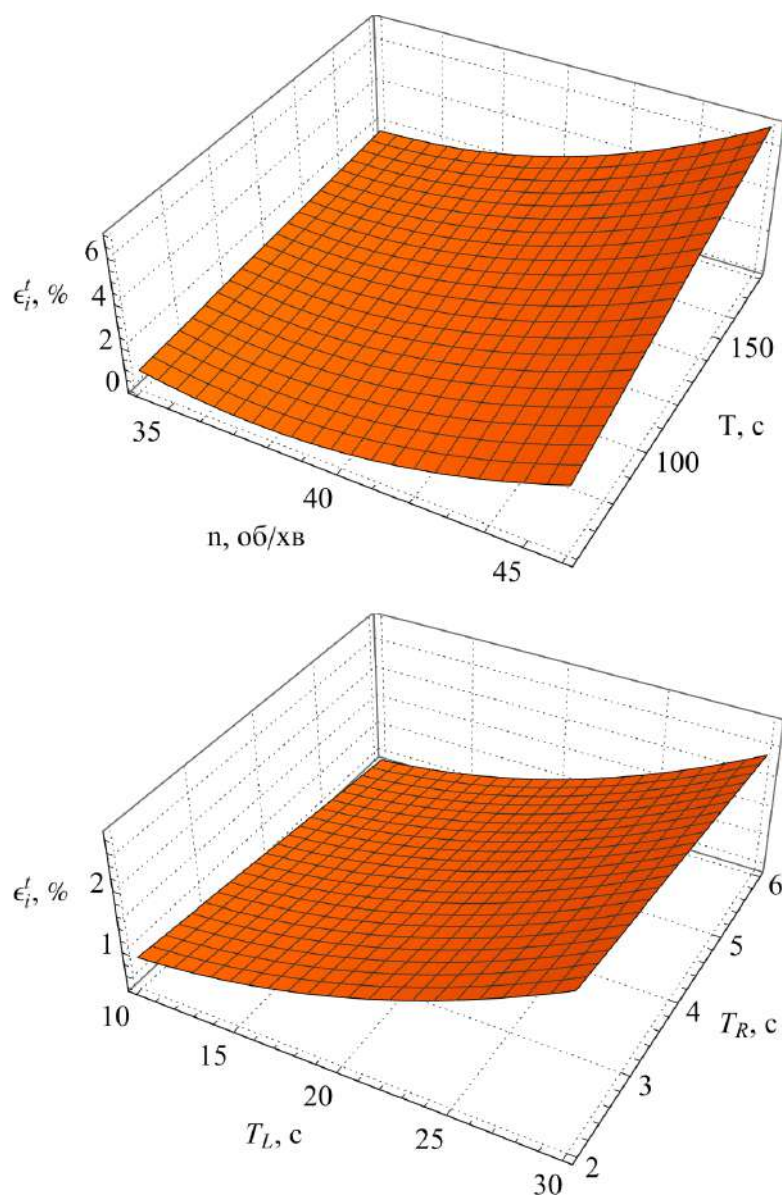


Рисунок 4.6 – Залежність відносного вмісту домішок в насіннєвій суміші лотка ϵ_i^t від факторів досліджень

На рисунку 4.7 показана залежність вмісту насіння основної культури в насіннєвій суміші циліндра ϵ_g^c від факторів досліджень. З рисунку видно, що зі збільшенням частоти обертання циліндра вміст насіння основної культури в насіннєвій суміші циліндра ϵ_g^c зменшується. Також вміст насіння основної культури в насіннєвій суміші циліндра зменшується зі збільшенням тривалості обертання циліндра. Тривалість обертання циліндра проти годинникової стрілки також впливає на вміст насіння основної культури в насіннєвій суміші циліндра: при збільшенні тривалості збільшується вміст насіння. Тривалість обертання циліндра за

годинниковою стрілкою не впливає на вміст насіння основної культури в насіннєвій суміші циліндра.

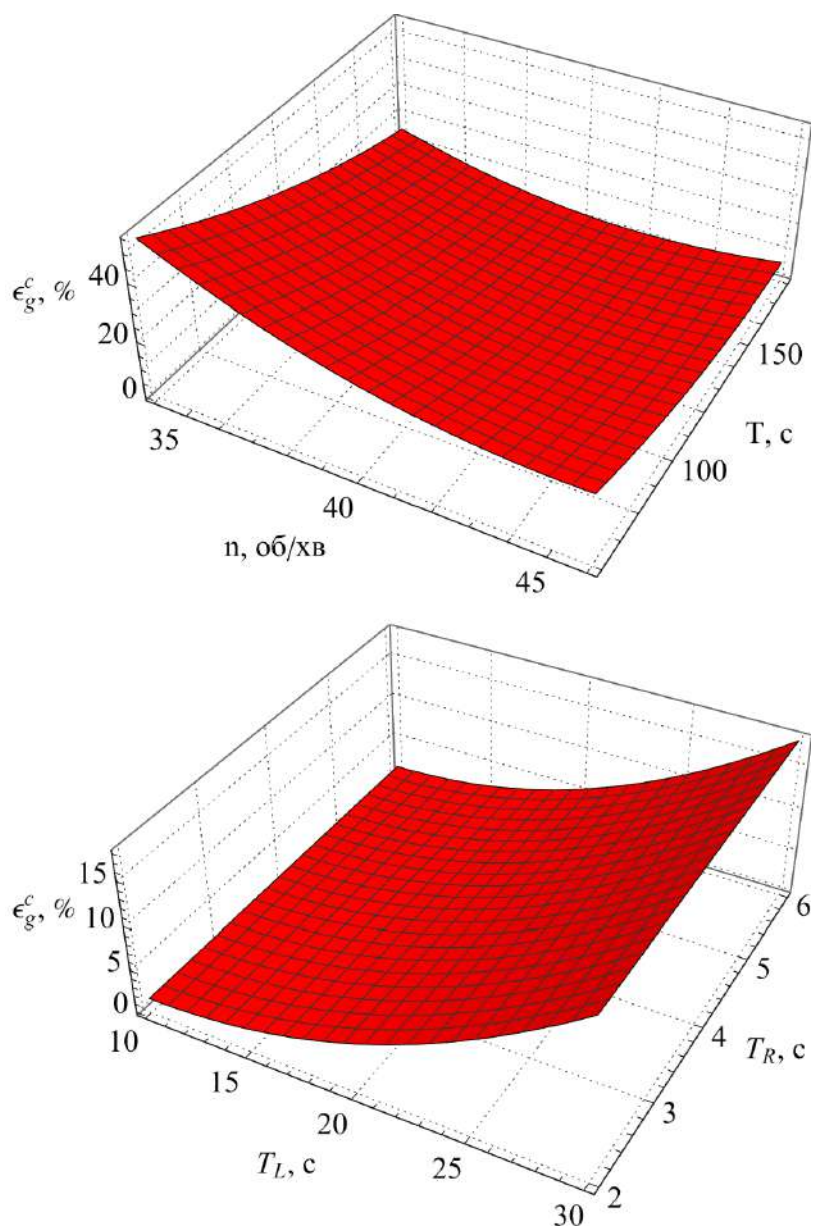


Рисунок 4.7 – Залежність вмісту насіння основної культури в насіннєвій суміші циліндра ϵ_g^c від факторів досліджень

В зв'язку з тим що для кожного критерію оцінки дослідів визначені оптимальні значення факторів, які не співпадають вирішимо компромісну задачу, яка має вигляд:

$$\begin{cases} \varepsilon^t(n, T_L, T_R, T) \rightarrow \max, \\ \varepsilon_g^c(n, T_L, T_R, T) \rightarrow \min, \\ \varepsilon_i^t(n, T_L, T_R, T) \leq 1. \end{cases} \quad (4.16)$$

Задачу (4.16) будемо вирішувати методом скалярного ранжування шляхом мінімізації мультиплікативної функції в програмному пакеті Wolfram Cloud (додаток К) спільно з (4.9), (4.12) і (4.14). В результаті отримуємо раціональні режимні параметри трієрного сепаратора: $n = 37,5$ об/хв., $T_L = 10,9$ с, $T_R = 4,8$ с, $T = 98,0$ с. При цьому $\varepsilon_i^t = 1$ %, $\varepsilon_g^c = 23,6$ %, $\varepsilon^t = 57,8$ %.

4.4 Порівняння теоретичних і експериментальних досліджень

Для перевірки правильності отриманих теоретичних та експериментальних даних необхідно провести їх порівняння. Порівняння буде проводитися за допомогою трьох критеріїв: Пірсона, Спирмена та Фішера. За допомогою критерію Фішера перевіряється адекватність отриманих моделей. Коефіцієнт кореляції Пірсона дозволяє визначити міру прямолінійного зв'язку між змінними, а коефіцієнт рангової кореляції Спирмена, який показує статистичну залежність між двома змінними. Порівняння теоретичної і експериментальної залежностей параметрів від факторів досліджень показано на рис. 4.8–4. 10.

Порівняння теоретичної і експериментальної залежностей мінімального θ_{\min} і максимального θ_{\max} значень кутів виходу насіння з чарунки циліндра трієра від маси вихідного матеріалу насіння M_0 та частоти обертання циліндра трієра n показано на рисунку 4.8. Статистичний аналіз показав, що коефіцієнт кореляції між теоретичними і експериментальними даними при варіюванні значеннями факторів Пірсона склав 0,99, коефіцієнт кореляції Спирмена склав 0,91, коефіцієнт кореляції Фішера склав 0,97. З цього можна зробити висновок, що теоретичні дані практично зійшлися з експериментальними.

Порівняння теоретичної і експериментальної залежностей відносної маси насінневої суміші в лотку ε^t від тривалості обертання циліндру проти годинникової стрілкою T_L і за годинникової стрілкою T_R показано на рис. 4.9. Статистичний аналіз

показав, що коефіцієнт кореляції між теоретичними і експериментальними даними при варіюванні значеннями факторів Пірсона склав 0,972, коефіцієнт кореляції Спирмена склав 0,883, коефіцієнт кореляції Фішера склав 0,924. З цього можна зробити висновок, що теоретичні дані практично зходяться з експериментальними.

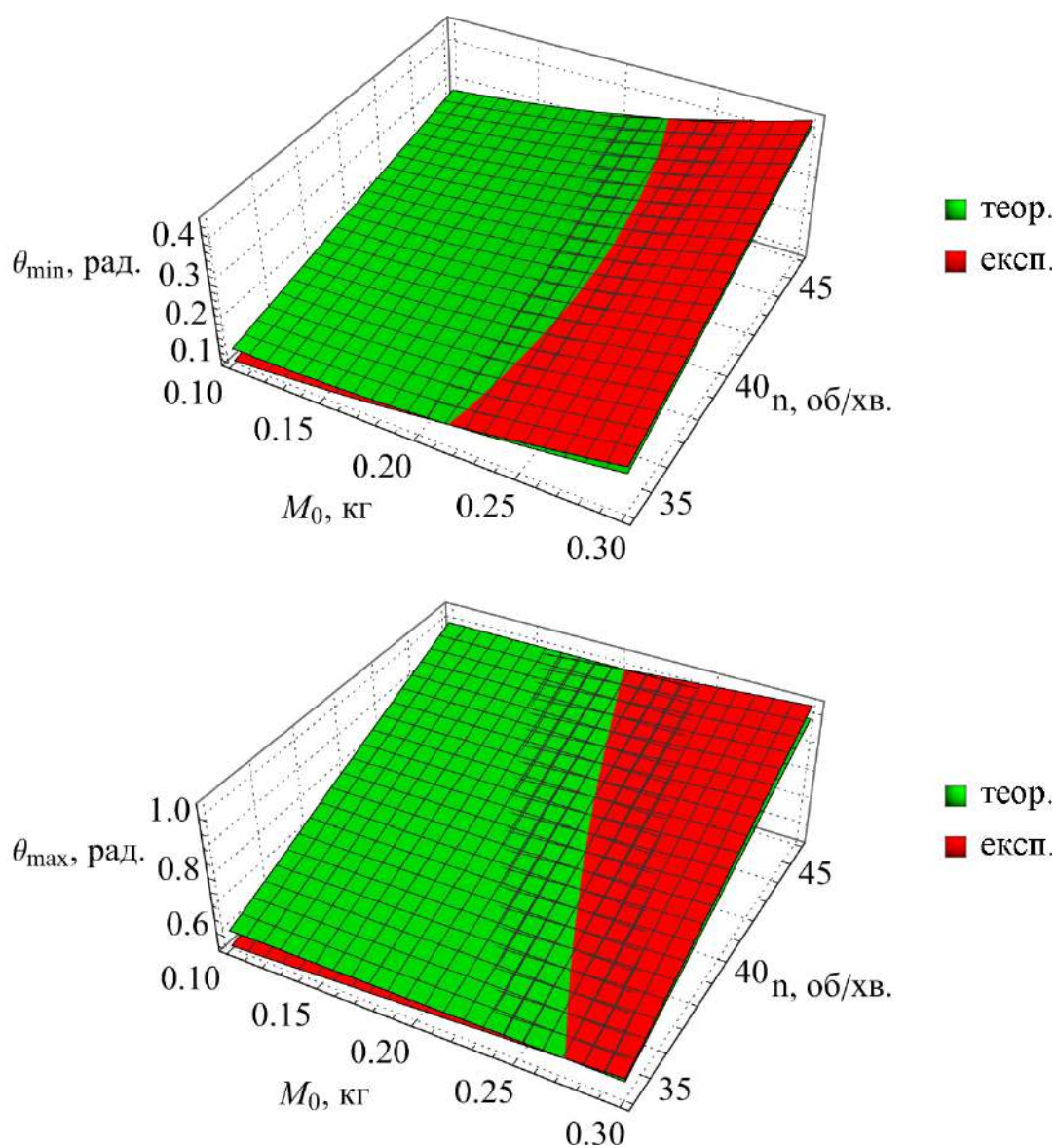


Рисунок 4.8 – Порівняння теоретичної і експериментальної залежностей мінімального θ_{\min} і максимального θ_{\max} значень кутів виходу насіння з чарунки циліндра трієра від маси вихідного матеріалу насіння M_0 та частоти обертання циліндра трієра n

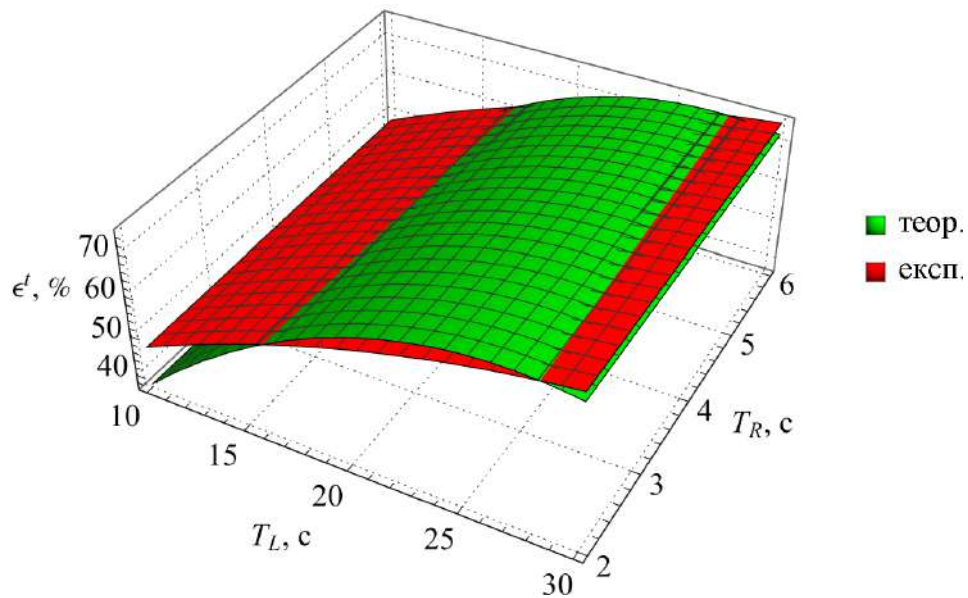


Рисунок 4.9 – Порівняння теоретичної і експериментальної залежностей відносної маси насінневої суміші в лотку ϵ^t від тривалості обертання циліндру проти годинникової стрілки T_L і за годинниковою стрілкою T_R

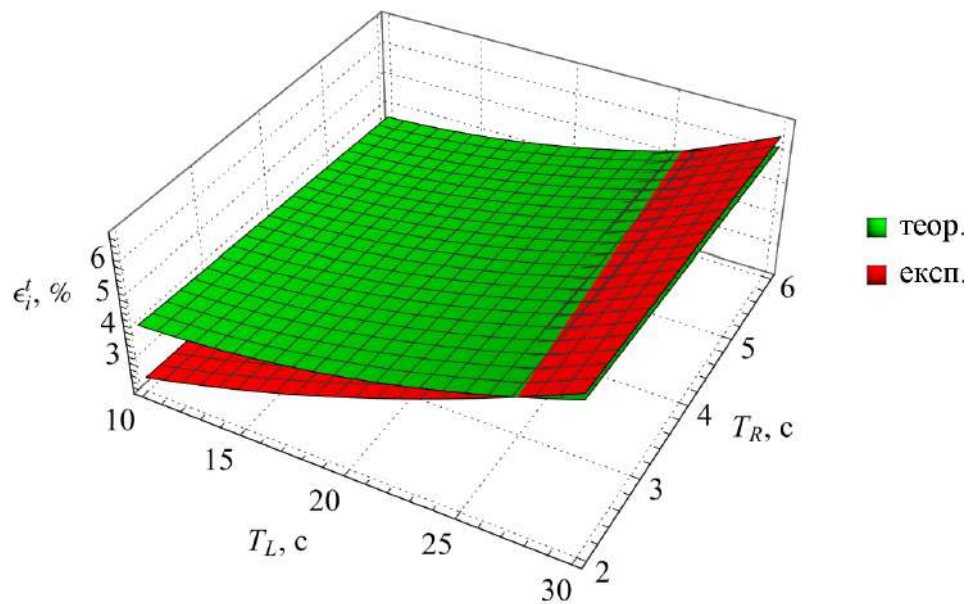


Рисунок 4.10 – Порівняння теоретичної і експериментальної залежностей відносного вмісту домішок в насінневій суміші лотка ϵ_i^t від тривалості обертання циліндру проти годинникової стрілкою T_L і за годинникової стрілкою T_R

Порівняння теоретичної і експериментальної залежностей відносного вмісту домішок в насінневій суміші лотка ϵ_i^t від тривалості обертання циліндру проти годинникової стрілкою T_L і за годинникової стрілкою T_R показано на рисунку 4.10.

Статистичний аналіз показав, що коефіцієнт кореляції між теоретичними і експериментальними даними при варіюванні значеннями факторів Пірсона склав 0,985, коефіцієнт кореляції Спирмена склав 0,989, коефіцієнт кореляції Фішера склав 0,98. З цього можна зробити висновок, що теоретичні дані практично зходяться з експериментальними.

4.5 Висновки з розділу

1. В результаті лабораторних досліджень визначено фізико-механічні властивості дрібнонасіньових культур (гірчиці, ріпаку, рижю), а саме: ефективний діаметр D_p , масу 1000 насінин M_{1000} , дійсну щільність ρ_p , швидкість вітання V_a , коефіцієнт тертя насінин між собою f_p , коефіцієнт тертя по сталі f_{st} , коефіцієнт тертя по ABS f_{ABS} , коефіцієнт Пуассона μ_p , модуль Юнга E_p , які використані при чисельному моделюванні процесу сепарації на селекційно-насіньовому трієрі.

2. В результаті експериментальних досліджень процесу сепарації дрібнонасіньових культур на селекційно-насіньовому трієрі отримано залежності (4.5) і (4.6) значень мінімального θ_{min} і максимального θ_{max} кутів виходу насіння з чарунки циліндра трієра від маси вихідного матеріалу насіння M_0 , частоти обертання циліндра n та вмісту домішок f_0 . Отримані залежності (4.5) і (4.6) увійшли до програмного забезпечення системи керування мехатронної системи.

3. В результаті експериментальних досліджень селекційно-насіньового трієра у складі мехатронної системи та обробки отриманих даних були визначені залежності у вигляді рівнянь регресії другого порядку маса насінневої суміші в лотку ε^t (4.9), відносного вмісту домішок в насінневій суміші лотка ε_i^t (4.12), відносного вмісту насіння основної культури в насінневій суміші циліндра ε_g^c (4.15) від частота обертання циліндра n , тривалостей його обертання проти і за годинникової стрілкою T_L і T_R , тривалості роботи T .

4. В результаті вирішення компромісної задачі методом скалярного ранжування шляхом мінімізації мультиплікативної функції в програмному пакеті Wolfram Cloud отримано раціональні режимні параметри трієрного сепаратора:

частота обертання циліндра $n = 37,5$ об/хв., тривалість обертання циліндра проти годинникової стрілки $T_L = 10,9$ с, тривалість обертання циліндра за годинниковою стрілкою $T_R = 4,8$ с, загальна тривалість обертання циліндра $T = 98,0$ с. При цьому відносний вміст домішок в насіннєвій суміші лотка ε_i^t складає 1 %, відносний вміст насіння основної культури в насіннєвій суміші циліндра $\varepsilon_g^c = 23,6$ %, відносна маса насіннєвої суміші в лотку $\varepsilon^t = 57,8$ %.

5. Порівняння отриманих експериментальних даних з теоретичними показало, що отримані дані практично зійшлися. Це підтверджує статистичний аналіз з отриманими значеннями коефіцієнтів кореляції між теоретичними та експериментальними залежностями: (2.23) і (4.5), (2.24) і (4.6), (2.38) і (4.12), що склали: коефіцієнт Пірсона – 0,99; 0,972 та 0,985, коефіцієнт Спирмена – 0,91; 0,883 та 0,989; та коефіцієнт Фішера, який склав - 0,97; 0,924 та 0,98 відповідно.

Основні наукові результати розділу опубліковано в працях автора [17, 128, 132, 133, 166, 167, 168].

5 РЕАЛІЗАЦІЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕНЬ

5.1 Випробування селекційно-насінницького трієра

Для випробувань розробленої конструкції (рис. 5.1) селекційно-насінницького трієра було удосконалено трієр K3538 (Cimbria Heid GmbH), який використовується в Інституті олійних культур Національної академії аграрних наук України (ІОК НААН).



1 – рама; 2 – бункер-дозатор; 3 – блок керування електродвигуном (частотний перетворювач); 4 – барабан із чарунками; 5 – лоток; 6 – відеокамера; 7 – персональний комп'ютер

Рисунок 5.1 – Загальний вигляд удосконаленого селекційно-насінницького трієра K3538 (Cimbria Heid GmbH)

Базова конструкція трієра K3538 містила раму, бункер-дозатор, блок керування електродвигуном (частотний перетворювач), барабан із чарунками і лоток. Удосконалення проведено шляхом використання наступних додаткових елементів: відеокамера Aspiring Repeat 4 Ultra HD 4K Dual Screen і персональний комп'ютер із встановленим удосконаленим програмним забезпеченням TracTrac (рис. 5.1).

Випробування включали два етапи. Перший був реалізований при раціональних параметрах базової конструкції селекційно-насінницького трієра відповідно до рекомендації з його експлуатації. Другий із застосування мехатронної системи керування режимними параметрами селекційно-насінницького трієра відповідно до алгоритму, який реалізований і доопрацьований у розділах 3.4–3.5, 4.4. Кожен етап був проведений із 10 разовою повторністю на насінневих сумішах гірчиці сорту Запоріжанка селекції ІОК НААН із попередньою очисткою на малому селекційному комбайні Wintersteiger. Маса однієї проби складала – 2 кг. Критерієм оцінки якості виконання процесу сепарації насінневої суміші є вміст домішок в насінневій суміші лотка ε_i^t і вміст насіння основної культури в насінневій суміші циліндра ε_g^c . Додатково визначалися показники продуктивності q і потужності P виконання зазначеного процесу.

Результати випробувань удосконаленого селекційно-насінницького трієра K3538 (Cimbria Heid GmbH) наведені в таблиці 5.1.

Застосування розробленої мехатронної системи керування селекційно-насінницького трієра K3538 дозволяє виконувати технологічний процес сепарації насінневої суміші гірчиці за довжиною її компонентів із продуктивністю $q = 123,5 \pm 6,3$ кг/год, вмістом домішок в насінневій суміші лотка $\varepsilon_i^t = 0,82 \pm 0,17$ %, вмістом насіння основної культури в насінневій суміші циліндра $\varepsilon_g^c = 16,85 \pm 2,69$ % і потужністю $P = 0,93 \pm 0,23$ кВт.

З даних таблиці 5.1 видно, що удосконалена конструкція селекційно-насінницького трієра у порівнянні з базовою конструкцією має більшу потужність, яка складає $P = 0,83$ кВт для удосконаленої конструкції і $P = 0,77$ кВт для базової конструкції. Удосконалена конструкція селекційно-насінницького трієра має меншу

продуктивність, яка складає $q = 123,5$ кг/год, в той час як базова конструкція має вищу продуктивність, яка складає $q = 163,9$ кг/год.

Таблиця 5.1 – Результати випробувань удосконаленого селекційно-насіницького трієра K3538 (Cimbria Heid GmbH)

№ повторності	Базова конструкції				Удосконалена конструкція			
	ε_i^t , %	ε_g^c , %	q, кг/год	P, кВт	ε_i^t , %	ε_g^c , %	q, кг/год	P, кВт
1	1,72	28,55	171,9	0,60	0,91	18,54	126,5	0,93
2	1,55	25,07	154,9	0,74	0,84	15,07	123,5	0,78
3	1,61	24,78	168,7	0,71	0,80	17,48	117,8	0,78
4	1,70	27,05	162,2	0,68	0,79	15,66	124,3	0,84
5	1,60	25,37	167,7	0,86	0,79	17,57	122,8	0,77
6	1,62	27,78	162,7	0,92	0,90	17,04	125,8	1,00
7	1,53	25,57	163,9	0,82	0,84	17,66	123,5	0,84
8	1,46	23,65	154,4	0,83	0,73	15,38	121,0	0,74
9	1,51	24,03	158,9	0,68	0,68	16,08	122,5	0,68
10	1,80	29,15	173,7	0,85	0,91	18,04	127,8	0,93
Середнє	1,61	26,10	163,9	0,77	0,82	16,85	123,5	0,83
Середнє квадратичне відхилення	0,10	1,91	6,6	0,10	0,08	1,21	2,86	0,10

Зменшення продуктивності пояснюється зміною напрямку обертання циліндра, при якому не відбувається процес сепарації і відповідно зменшується час роботи трієра, але при цьому отримується кращий результат проведення технологічного процесу сепарації насінневого матеріалу, оскільки знижується вміст домішок в насінній суміші лотка, що складає $\varepsilon_i^t = 1,62$ % для базової конструкції і $\varepsilon_i^t = 0,82$ % для удосконаленої конструкції. Таким чином, удосконалення конструкції селекційно-насіницького трієра дозволить отримати більш якісно очищене насіння, яке буде відповідати існуючим вимогам ДСТУ 2240-93 «Насіння сільськогосподарських культур. Сортові та посівні якості» [4].

5.2 Впровадження результатів досліджень

Дослідження, що складають основу дисертації, проведено в Дніпровському державному аграрному університеті (ДДАЕУ) згідно з планом науково-дослідної роботи: «Техніко-технологічне забезпечення комплексної безвідходної переробки рослинної сировини у біологічно цінні харчові продукти і кормові добавки», № ДР 0120U100322, 2020–2022 рр. (додаток Ж) та Інституті олійних культур Національної академії аграрних наук України (ІОК НААН) згідно з планом науково-дослідної роботи: «Техніко-технологічне оснащення первинного насінництва олійних культур», № ДР 0120U105450, 2022 р. (додаток И) і договором про наукове спіробіництво № 1 від 24.01.2022 р. між ДДАЕУ і ІОК НААН (додаток К).

Селекційно-насінницький трієр для сепарації насіння дрібнонасінневих олійних культур у складі мехатронної системи впроваджено у виробництво Інституту олійних культур Національної академії аграрних наук України (додаток Л). Вищезазначений пристрій дозволяє виконувати технологічні процеси сепарації, очищення й розділення зернових і насінневих сумішей за геометричними розмірами із більш високою продуктивністю. Маніпуляції із режимними параметрами адаптивного селекційно-насінницького трієра дозволяють підлаштовувати його до зміни складу насінної суміші, тим самим підвищуючи якість сепарації. Окрім цього, через автоматичне підлаштування режимних параметрів адаптивного селекційно-насінницького трієра, участь оператора установки в процесі сепарації практично нівелюється, що зменшує трудові витрати.

ТОВ «Укрнасінняпром» прийняло для впровадження у виробництво науково-методичні рекомендації з налагодження трієрного сепаратора насінневого матеріалу дрібнонасінневих культур (додаток М). Прийняті рекомендації дозволили зменшити витрати електроенергії обладнання і машин для калібрування насіння на 6 % і зменшити витрати на працю на 5 %.

Результати науково-технічної роботи у вигляді конструкторської та технічної документації селекційно-насінницького трієра впроваджені і використані на виробництві ТОВ НВО «Сортувальні машини» для виготовлення відповідного

дослідного зразка (додаток Н). Отримана документація буде використовуватися для проведення дослідно-виробничих випробувань сепаратора з метою поставлення його на серійне виробництво.

ТОВ «ВНІС ГЕНЕТИКС» отримало рекомендації з налагодження селекційно-насінницького трієра для сепарації, розділення і очищення насіння дрібнонасінневих олійних і зернових культур у вигляді відповідних математичних залежностей і конструктивно-технологічних схем (додаток О). Отримані рекомендації використовуються при наукових дослідженнях в області селекції і генетики в ТОВ «ВНІС ГЕНЕТИКС». В результаті використання розроблених методичних засад налаштування і калібрування селекційно-насінницького трієра встановлено зменшення енерговитрат на 12,1 % і витрат на оплату праці на 9,5 %

5.3 Техніко-економічна ефективність застосування розробленого селекційно-насінницького трієра

З метою визначення ефективності впровадження розробленого селекційно-насінницького трієра під час селекційно-насінницького процесу необхідно провести його економічну оцінку.

Проведення розрахунків було виконано у відповідності з методом економічного оцінювання технічного засобу на стадії випробування, який є галузевим стандартом України ДСТУ 4397-2005 [169] і ГСТУ 3-37-4-94 [170] (источник). Економічна оцінка була виконана згідно методичних рекомендацій [171, 172, 173, 174]. Об'єктом економічного оцінювання процесу сепарації насінневої суміші при виконанні селекційно-насінницького процесу обрано сорт гірчиці Запоріжанка селекції ІОК НААН. Вихідними даними для проведення розрахунку прийнято елітне насіння гірчиці, що було отримане після збирання комбайном, загальною масою 5000 кг.

Подальші розрахунки проведені спираючись на результати випробування отримані в розділі 5.1, табл. 5.1.

Вихідні дані для економічного розрахунку наведені у таблиці 5.2.

Таблиця 5.2 – Вихідні дані для економічного розрахунку

Ціна товарного насіння, грн./т	50000
Ціна елітного насіння, грн./т	200000
Вартість електроенергії, грн.	6,8
Тарифна ставка, грн./год	200

Зведені дані техніко-економічного розрахунку представлені в табл. 5.3.

Таблиця 5.3 – Зведені дані техніко-економічного розрахунку

Показник	Базовий селекційно-насінницький трієр	Удосконалений селекційно-насінницький трієр
Маса матеріалу, кг	5000	5000
Продуктивність, кг/год.	163,9	123,5
Споживана потужність, кВт	0,77	0,83
Очищена насінєва суміш, %	98,39	99,18
Втрата ліквідного насіння, %	26,10	16,85
Маса втраченого ліквідного насіння, кг	1305,0	842,5
Тривалість роботи, год.	30,5	40,5
Персонал, люд.	1	1
Вартість машини, грн.	200000	280000
Витрати електроенергії, кВт·год.	23,5	33,6
Трудові витрати, люд.·год.	30,5	40,5
Затрати на електроенергію, грн.	159,73	228,50
Затрати на працю, грн.	6101,28	8097,17
Затрати на амортизацію, грн.	6000	8400
Затрати на ремонт і ТО, грн.	12000	16800
Затрати на втрати насіння, грн	195750,00	126375,00
Загальні втрати, грн	220011,01	159900,67
Питомі втрати, грн/кг	44,00	31,98
Додаткові капіталовкладення, грн	-	80000
Додатковий ефект, грн	-	69375,00
Економічний ефект, грн	-	60110,34
Питомий економічний ефект, грн./кг	-	12,02
Строк окупності додаткових капіталовкладень, рік	-	1,33

З таблиці видно, що запропонована удосконалена конструкція селекційно-насінницького трієра має вищі капіталовкладення (до 40 %) і затрати на його амортизацію, ремонт і технічне обслуговування. Витрати на електроенергію удосконаленого селекційно-насінницького трієра вище на 43 % у порівнянні з базовою конструкцією, затрати на працю вище на 32,7 %, затрати на ремонт і технічне обслуговування вищі а 40 %, але при цьому затрати на втрати насіння нижчі на 35,4 %. Економічний ефект досягається за рахунок зменшення втрат ліквідного насіння в процесі сепарації насінневої суміші (35,4%). Питомий економічний ефект процесу сепарації насінневої суміші гірчиці масою 5000 кг складає 12,02 грн/кг. Строк окупності додаткових капіталовкладень складає 1,33 роки.

5.4 Висновки з розділу

1. Порівняння базової і удосконаленої (у складі мехатрони системи) конструкцій селекційно-насінницького трієра показало, що удосконалений трієр має більшу потужність $P = 0,83$ кВт і меншу продуктивність $q = 123,5$ кг/год. Зменшення продуктивності пояснюється зміною напрямку обертання циліндра, але при цьому підвищується ефективність технологічного процесу сепарації насінневого матеріалу, оскільки знижується вміст домішок в насінневій суміші лотка $\varepsilon_l^t = 0,82 \pm 0,17$ % і вміст насіння основної культури в насінневій суміші циліндра $\varepsilon_g^c = 16,85 \pm 2,69$ %.

2. Селекційно-насінницький трієр для сепарації насіння дрібнонасінневих олійних культур у складі мехатронної системи впроваджено у виробництво ІОК НААН. ТОВ «Укрнасінняпром» прийняло для впровадження у виробництво науково-методичні рекомендації з налагодження трієрного сепаратора насінневого матеріалу дрібнонасінневих культур. Результати науково-технічної роботи у вигляді конструкторської та технічної документації селекційно-насінницького трієра впроваджені і використані на виробництві ТОВ НВО «Сортувальні машини» для виготовлення відповідного дослідного зразка. ТОВ «ВНІС ГЕНЕТИКС» отримало рекомендації з налагодження селекційно-насінницького трієра для сепарації,

розділення і очищення насіння дрібнонасінневих олійних і зернових культур у вигляді відповідних математичних залежностей і конструктивно-технологічних схем.

3. У результаті проведення економічної оцінки встановлено, що запропонована удосконалена конструкція селекційно-насінницького трієра у складі мехатронної системи має більші капіталовкладення (до 40 %) і вищі затрати на його амортизацію, ремонт і технічне обслуговування (27 %). Економічний ефект досягається за рахунок зменшення втрат ліквідного насіння в процесі сепарації насінневої суміші (35,4 %). Питомий економічний ефект процесу сепарації насінневої суміші гірчиці масою 5000 кг складає 12,02 грн/кг, а строк окупності додаткових капіталовкладень складає 1,33 роки.

Основні наукові результати розділу опубліковано в працях автора [132, 133].

ВИСНОВКИ

В роботі вирішена наукова задача підвищення ефективності функціонування селекційно-насінницького трієра для забезпечення прецизійної сепарації насінневого матеріалу дрібнонасінневих культур. За результатами досліджень зроблено наступні висновки:

1. Представлений аналіз прецизійного техніко-технологічного забезпечення процесу сепарації насінневого матеріалу дрібнонасінневих культур за геометричними розмірами дає змогу стверджувати про необхідність удосконалення трієрних сепараторів базуючись на автоматизованому керуванні їх параметрами з використанням фото- або відео-фіксації процесу сепарації насінневого матеріалу із подальшою обробкою. Розроблено конструктивно-технологічну схему селекційно-насінницького трієра у складі мехатронної системи. Відмінність запропонованої конструкції від традиційної полягає у фіксації фотокамерою траєкторії польоту насінин та обробці цієї інформації, що в подальшому дозволяє змінювати частоту обертання мотор-редуктора і як наслідок циліндра із чарунками, кут нахилу лотка, кут повороту заслінки із кроковим двигуном бункера-дозатора. Керування режимними параметрами селекційно-насінницького трієра дозволяє підлаштовувати його до зміни складу насінневої суміші, що підвищує якість сепарації і зменшує втрати ліквідного насіння.

2. В результаті аналітичних досліджень процесу взаємодії компонентів насінневої суміші дрібнонасінневих культур із робочим органом селекційно-насінницького трієра отримано залежність кута відхилення центра мас компонента насінневої суміші від кута повороту циліндра $\beta(\theta)$. Отримана залежність дає змогу визначити мінімальний кут повороту циліндра із чарунками при якому починає обертатися компонент насінневої суміші відносно центра мас: $\theta_{\min}(n = 30 \text{ об/хв.}, D = 0,2 \text{ м}) = 0,12 \text{ рад.} = 6,9^\circ$; $\theta_{\min}(n = 45 \text{ об/хв.}, D = 0,2 \text{ м}) = 0,33 \text{ рад.} = 18,9^\circ$; $\theta_{\min}(n = 60 \text{ об/хв.}, D = 0,2 \text{ м}) = 0,52 \text{ рад.} = 29,8^\circ$; $\theta_{\min}(n = 30 \text{ об/хв.}, D = 0,4 \text{ м}) = 0,18 \text{ рад.} = 10,3^\circ$; $\theta_{\min}(n = 30 \text{ об/хв.}, D = 0,6 \text{ м}) = 0,29 \text{ рад.} = 16,6^\circ$.

3. Розроблено модель процесу сепарації насінневого матеріалу дрібнонасінневих культур на селекційно-насінницькому трієрі в програмному пакеті Simcenter Star-CCM+. В результаті чисельного моделювання процесу сепарації насінневого матеріалу дрібнонасінневих культур на селекційно-насінницькому трієрі отримані залежності у вигляді рівнянь регресії другого порядку значень мінімального θ_{\min} (2.23) і максимального θ_{\max} (2.24) кутів виходу насіння з чарунок циліндра від факторів досліджень (діаметр циліндра D , частота обертання циліндра n , кількість насінин і домішок в насінневій суміші N_0). За результатами моделювання отримані залежності у вигляді рівнянь регресії другого порядку кількості всіх компонентів N (2.27) і відносного вмісту домішок ε (2.30) в насінневій суміші, яка знаходилася в межах мінімального θ_{\min} і максимального θ_{\max} кутів повороту циліндру трієра від факторів досліджень. Вирішуючи компромісну задачу в програмному пакеті Wolfram Cloud, яка зводиться до мінімізації відносного вмісту домішок ε і максимізації кількості всіх компонентів насінневої суміші N , які знаходилися в межах мінімального θ_{\min} і максимального θ_{\max} кутів повороту циліндру, отримані раціональні конструктивно-технологічні параметри селекційно-насінницького трієрного сепаратора: $D = 0,38$ м, $n = 46,8$ об/хв., $N_0 = 2722$ шт. При цих параметрах критерії оптимізації дорівнювали $N = 251$ шт., $\varepsilon = 5,89$ %, $\theta_{\min} = 0,22$ рад., $\theta_{\max} = 1,26$ рад.

4. В результаті чисельного моделювання процесу сепарації насінневого матеріалу дрібнонасінневих культур на селекційно-насінницькому трієрі при змінній частоті обертання отримана динаміка зміни кількості насінин і домішок N_1 і відносного вмісту домішок ε_1 в насінневій суміші лотка. В результаті чисельного моделювання процесу сепарації насінневого матеріалу дрібнонасінневих культур на селекційно-насінницькому трієрі при змінній частоті обертання отримані залежності кількості насінин і домішок N_1 , (2.35) відносного вмісту домішок ε_1 (2.38) в насінневій суміші лотка і умовної продуктивності трієра Q_N (2.41) від тривалості обертання циліндра проти годинникової стрілки T_L і за годинниковою стрілкою T_R . Вирішуючи компромісну задачу в програмному пакеті Wolfram Cloud отримуємо

раціональні режимні параметри трієрного сепаратора: $T_L = 13,3$ с, $T_R = 2$ с. При цих параметрах критерії оптимізації дорівнювали $Q_N = 83,9$ шт./с, $\varepsilon_l = 4,26$ %.

5. В результаті експериментальних досліджень селекційно-насіницького трієра у складі мехатронної системи та обробки отриманих даних були визначені залежності у вигляді рівнянь регресії другого порядку маси насінневої суміші в лотку ε^t (4.9), відносного вмісту домішок в насінневі суміші лотка ε_i^t (4.12), відносного вмісту насіння основної культури в насінневі суміші циліндра ε_g^c (4.15) від частоти обертання циліндра n , тривалості його обертання проти і за годинниковою стрілкою T_L і T_R , тривалості роботи T . Вирішуючи компромісну задачу в програмному пакеті Wolfram Cloud отримано раціональні режимні параметри трієрного сепаратора: $n = 37,5$ об/хв., $T_L = 10,9$ с, $T_R = 4,8$ с, $T = 98,0$ с. При цьому $\varepsilon_i^t = 1$ %, $\varepsilon_g^c = 23,6$ %, $\varepsilon^t = 57,8$ %. Порівняння отриманих експериментальних даних з теоретичними показало, що отримані дані практично зійшлися. Це підтверджує статистичний аналіз з отриманими значеннями коефіцієнтів кореляції між теоретичними та експериментальними залежностями: (2.23) і (4.5), (2.24) і (4.6), (2.38) і (4.12), що склали: коефіцієнт Пірсона – 0,99; 0,972 та 0,985, коефіцієнт Спирмена – 0,91; 0,883 та 0,989; та коефіцієнт Фішера, який склав - 0,97; 0,924 та 0,98 відповідно.

6. Спираючись на результати теоретичних (залежності (2.23), (2.24), (2.38)) і експериментальних (залежності (4.5), (4.6), (4.12)) досліджень розроблено спосіб і алгоритм роботи мехатронної системи керування селекційно-насіницьким трієром, який базується на удосконаленому програмному пакеті TracTrac, що дозволяє розпізнавати траєкторію польоту насіння по відеозображенню. Порівняння базової і удосконаленої (у складі мехатронної системи) конструкцій селекційно-насіницького трієра показало, що удосконалений трієр має більшу потужність $P = 0,83$ кВт і меншу продуктивність $q = 123,5$ кг/год. Зменшення продуктивності пояснюється зміною напрямку обертання циліндра, але при цьому підвищується ефективність технологічного процесу сепарації насінневого матеріалу, оскільки знижується вміст домішок в насінневі суміші лотка $\varepsilon_i^t = 0,82 \pm 0,17$ % і вміст насіння основної культури в насінневі суміші циліндра $\varepsilon_g^c = 16,85 \pm 2,69$ %.

7. У результаті проведення економічної оцінки встановлено, що запропонована удосконалена конструкція селекційно-насінницького трієра у складі мехатронної системи має більші капіталовкладення (до 40 %) і вищі затрати на його амортизацію, ремонт і технічне обслуговування (27 %). Економічний ефект досягається за рахунок зменшення втрат ліквідного насіння в процесі сепарації насінневої суміші (35,4 %). Питомий економічний ефект процесу сепарації насінневої суміші гірчиці масою 5000 кг складає 12,02 грн/кг, а строк окупності додаткових капіталовкладень складає 1,33 роки.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Державний реєстр сортів рослин, придатних для поширення в Україні на 2019 рік (2019). Київ: Міністерство аграрної політики та продовольства України. 447 с.
2. Shevchenko, I. A., Aliev, E. B. (2018). Research on the photoelectronic separator seed supply block for oil crops. *INMATEH – Agricultural Engineering*, 54 (1), 129–138.
3. Алієв, Е. Б. (2019). *Фізико-математичні моделі процесів прецизійної сепарації насіннєвого матеріалу соняшнику*: монографія. Запоріжжя: СТАТУС. 196 с. ISBN 978-617-7759-32-3.
4. ДСТУ 2240-93. (1993). Насіння сільськогосподарських культур. Сортові та посівні якості. Технічні умови. Київ: Держстандарт України. 74 с.
5. Державна цільова програма розвитку аграрного сектору економіки на період до 2020 року (2016). Офіційний вісник України. № 24. Київ: Кабінет Міністрів України. 11 с.
6. Алієв Ельчин Бахтияр огли. (2020) *Механіко-технологічні основи процесу прецизійної сепарації насіннєвого матеріалу соняшнику* (дисертація доктора технічних наук, 05.05.11). Запоріжжя, Україна.
7. Белобородов, В.В. (1966). *Основные процессы производства растительных масел*. Монография. Пищевая промышленность.
8. Копейковский, В.М. (1982). *Технология производства растительных масел*. Монография. Легкая и пищевая промышленность.
9. Пешук, Л.В., Носенко Т.Т. (2011). *Біохімія та технологія олієжирової сировини*. Навчальний посібник. Центр учбової літератури.
10. Руднєв, С.Д. (2004). *Фізико-механічні властивості сировини і продукції*. Навчальний посібник. Кемеровський технологічний інститут харчової промисловості. Кемерово.
11. Буянов, А.И., Воронюк, Б.А. (1970). *Физико-механические свойства растений, грунтов и удобрений (Методы испытаний, приборы, характеристики)*. Монография: Колос, 1970, 424 с.

12. Богомоллов О.В., Ірклієнко В.І., Завгородній О.І., Нетецький Л.Г., Кісь-Коркіщенко Л.В. (2020). Моделювання процесу здрібнення зернівки у робочій камері здрібнювача сколювальної дії. *Журнал «Технічний сервіс агропромислового, лісового та транспортного комплексів»*. 23. 194–199.
13. Dash A.K., Pradhan R.C., Das L.M., Naik S.N. (2008). *Some physical properties of simarouba fruit and kernel*. *Int. Agrophysics*, 22, 111–116.
14. Kachru, R.P.; Gupta, R.K.; Alam, A. (1994). Physico-chemical Constituents and Engineering Properties, *Scientific Publishers*, 120–122.
15. Pradhan R, Meda V, Naik S. (2010). Physical Properties of Canadian Grown Flaxseed in Relation to Its Processing. *International Journal of Food Properties*. 732–743. DOI: 10.1080/10942910902818137
16. Singh A. K., Sharma V., Yadav K. C. (2014). Effect of Moisture Content on Physical Properties of Flaxseed. *Research & Reviews: Journal of Food Science and Technology*, 3(2), 19–27.
17. Алієв Е.Б., Лупко К. О. (2020). Морфологічні ознаки і фізико-механічні властивості насіння дрібнонасінних культур. *Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин*, 50, 27–35. DOI: 10.32515/2414-3820.2020.50.27-35.
18. Taheri-Garavand A., Nassiri A., Gharibzahedi M.T. (2012). Physical and mechanical properties of hemp seed. *International agrophysics*, 26, 211–215. DOI: 10.2478/v10247-012-0031-9
19. Ixtaina V. (2008). Physical properties of chia (*Salvia hispanica* L.) seeds. *Industrial Crops and Products*, 1–8. DOI: 10.1016/j.indcrop.2008.03.009.
20. Garavand A. T., Rafiee S., Taghi Gharib-Zahedi S. M., Mousavi S. M. (2009). Some of Nutritional and Engineering Properties of Sesame Seed (*Sesamum Indicum* L.). *International Agricultural Engineering Conference, 200*. 1–10.
21. Brandenburg, N. (1977). The principles and practice of seed cleaning: separation with equipment that senses dimension, shape, density, and terminal velocity of seeds. *Seed science and technology*, 5. 173–186.

22. Harper, J., Lovell, P., Moore K. (1970). The shapes and sizes of seeds. *Annual Review of Ecology and Systematics*. 327–356.
23. Harmond, J., Brandenburg, N., Jensen, L. (1965). Physical properties of seed. *Transactions of ASAE*, 8. 30–32.
24. Jayas, D., Cenkowski, S. (2006). Grain property values and their measurement. *Handbook of Industrial Drying*. 575–603.
25. Riahi, E., Ramaswamy, H. (2003). Structure and composition of cereal grains and legumes. *Handbook of Postharvest Technology*. 17–40.
26. Sablani, S.S., Ramaswamy, H.S. (2003). Physical and thermal properties of cereal grains. *Handbook of Postharvest Technology*. 17–40.
27. Öztürk, T., Esen, B. (2008). Physical and mechanical properties of barley. *Agricultura tropica et subtropica*, 41. 117–121.
28. Tavakoli, M., Tavakoli, H., Rajabipour, A., Ahmadi, H., Gharib-Zahedi, S.M.T. (2009). Moisture-dependent physical properties of barley grains. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*. 84–91.
29. Sologubik, C., Campañone, L., Pagano, A., Gely, M. (2013). Effect of moisture content on some physical properties of barley. *Industrial Crops and Products*. 762–767.
30. Karaj, S., Müller, J. (2010). Determination of physical, mechanical and chemical properties of seeds and kernels of jatropha curcas. *Industrial Crops and Products*. 129–138.
31. Авдеев, А., Сечкин, В., Галкин, В., Новиков, М., Кошурников, А., Галкин, А., Ерошенко, Л. (2005). *Агрегаты и комплексы для послеуборочной обработки и хранения зерна и семян: учебное пособие*. Санкт-Петербург: СПГАУ.
32. Галкин, В., Хавыев, А., Хандриков, В., Грубов, К., Менгалиев, И., Килин, К., Козловский, И. (2013). Исследование процессов движения и разделения компонентов семенной смеси в вибропневмооживленном слое. *Научно-практический журнал. Пермский аграрный вестник*. 3(3). 20–23.
33. Чурсінов Ю. О., Кудрявцев І. М., Луценко М. В. (2022). Розробка мобільної установки для сортування зернових відходів. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Серія: Нові рішення в сучасних технологіях, 2(12). 93–99.

34. Дринча В. (2006). *Исследование сепарации семян и разработка машинных технологий их подготовки*. Воронеж: Издательство НПО «МОДЭК».
35. Чурсінов Ю. О., Луценко М. В., Кудрявцев І. М. (2022). Техніко-економічне обґрунтування доцільності сортування відходів зернових та олійних культур. *Наука технології інновації*. 2(22). 61–67.
36. Чурсінов Ю. О., Ковальова О. С., Калина В. С., Пилипенко Г. О., Хомик Н. (2020). Аналітичне дослідження перспективи процесів автоматизації прийому, оцінки якості та закладання зерна на зернопереробних підприємствах. *Праці Таврійського державного агротехнологічного університету*. 20(1). 93–105.
37. Федоренко, В., Ревякин, Е. (2006). *Зерноочистка – состояние и перспективы*. М.: ФГНУ «Росинформагротех».
38. Макаров, П., Юнусов, Г., Казанков, И., Казанков, С., Богданов, Г., Гайнанов, Х., Маслова, Н. (2007). *Механизация послеуборочной обработки зерна*. Йошкар-Ола: МарГУ.
39. Чижиков, А., Бабченко, В., Машков, Е. *Операционная технология послеуборочной обработки и хранения зерна*. М.: Россельхозиздат. 1981. 192 с.
40. Алієв Е.Б., Бабин І.А. Сокол С.П. (2023). Чисельне моделювання процесу аеродинамічної сепарації дрібнозернистого сипкого матеріалу. *Техніка, енергетика, транспорт АПК*. 1(120). 5–13. DOI: 10.37128/2520-6168-2023-1-1
41. Козаченко О.В., Пахучий А.М., Шкрегаль О.М. (2020). Вплив конструктивно-режимних параметрів на формування повітряного потоку обчисувальної жниварки. *Техніка та енергетика*. Київ: НУБіП, 11(1). 21–27. DOI: 10.31548/machenergy2020.01.021
42. Kozachenko O., Pakhuchyi A., Shkregal O., Sorokin S., Dyakonov S., Gusarenko N, 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(107). 64–69. DOI: 10.15587/1729-4061.2020.212733
43. Kozachenko O., Pakhuchyi A., Shkregal O., Dyakonov S., Bleznyuk O., Kadenko V. (2019). Results of numerical modeling of the process of harvesting the seeds

of flax by a harvester of the stripping type. *Eastern European Journal of Enterprise Technologies*, 3(99). 66–74. DOI: 10.15587/1729-4061.2019.169664

44. Kotov B., Stepanenko S., Tsurkan O., Hryshchenko V., Pantsyr Y., Garasymchuk I., Spirin A., Kupchuk I. (2023). Fractioning of grain materials in the vertical ring air channel during electric field imposition. *Przegląd Elektrotechniczny*. 99(1). 100–104. DOI: 10.15199/48.2023.01.19

45. Stepanenko S., Kotov B., Kuzmych A., Kalinichenko R., Hryshchenko V. (2023). Research of the process of air separation of grain material in a vertical zigzag channel. *Journal of Central European Agriculture*, 24(1). 225–235. DOI: 10.5513/JCEA01/24.1.3732

46. Stepanenko S., Kotov B., Kuzmych A., Shvydia V., Kalinichenko R., Kharchenko S., Shchur T., ...Dziki D. (2022). To the Theory of Grain Motion in an Uneven Air Flow in a Vertical Pneumatic Separation Channel with an Annular Cross Section. *Processes*, 10(10). 19–29. DOI: 10.3390/pr10101929

47. Naumenko M., Sokol S., Filipenko D., Guridova V., Kharytonov M. (2018). Numeric model of the grain mixture flow in a cylindrical sieve which revolves around the inclined axis. *INMATEH – Agricultural Engineering*, 56(3). 67–74.

48. Кобець А., Дирда В., Науменко М., Сокол С., Філіпенко Д., Гурідова В. (2019). Розподіл сипкого матеріалу в решеті з горизонтальною віссю обертання. *Геотехнічна механіка*. 144. 111–116. DOI: 10.15407/geotm2019.144.111

49. Kharchenko S., Kovalyshyn S., Zavgorodniy A., Kharchenko F., Mikhaylov Y. (2019). Effective sifting of flat seeds through sieve. *INMATEH – Agricultural Engineering*. 58 (2). 17–26. DOI: 10.35633/INMATEH-58-02

50. Заїка, П. (2006). *Теорія сільськогосподарських машин. Очистка і сортування насіння*. Харків: Око.

51. Зайка, П., Мазнев, Г. (1978). *Сепарация семян по комплексу физико-механических свойств*. М.: Колос..

52. Адамчук, В., Прилуцький, А., Заришняк, А., Степаненко, С. (2014). Концепція комплексного вирішення проблеми післязбиральної обробки і зберігання

зерна в сільськогосподарських підприємствах України. *Механізація та електрифікація сільського господарства. Глевах: ННЦ «ІМЕСГ»*. 99. 40–56.

53. Aliiev E., Gavrilenko A., Tesliuk H., Tolstenko A., Koshul'ko V. (2019). Improvement of the sunflower seed separation process efficiency on the vibrating surface. *Acta Periodica Technologica, APTEFF.*..50. 12–22. DOI: 10.2298/APT1950012A

54. Яропуд В. М., Дацюк Д., Теслюк Г. В. (2023). Використання методу дискретних елементів у моделюванні руху та укладання насіння дрібно-насінневих культур. *Вібрації в техніці та технологіях*. 1(108). 73–82. DOI: 10.37128/2306-8744-2023-1-8

55. Nykyforov A., Antoshchenkov R., Halych I., Kis V., Polyansky P., Koshulko V., Kilimnik I. (2022). Construction of a regression model for assessing the efficiency of separation of light-weight seeds on vibratory machines involving measures to reduce the harmful influence of the aerodynamic factor. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2(1 (116)). 24–34. DOI: 10.15587/1729-4061.2022.253657

56. Козаченко О., Алієв Е., Бакум М., Михайлов А., Кречот М. (2021). Обґрунтування ефективності використання віброфрикційного сепаратора при підготовці насінневого матеріалу гірчиці. *Науково-технічний бюлетень Інституту олійних культур НААН*, 31. 1–10. DOI: 10.36710/ioc-2021-31-13

57. Богомолів О.В., Завгородній О.І., Ольшанський В.П., Богомолів О.О. (2019). До питання сепарації зернових сумішей за сукупністю пружних та аеродинамічних властивостей. *Сучасні напрямки технології та механізації переробних і харчових виробництв: Вісник ХНТУСГ*. 207. 5–11.

58. Алієв Е., Яропуд В. (2017). Результати чисельного моделювання процесу роботи блока подачі насіння фотоелектронного сепаратора. *Всеукраїнський науково-технічний журнал «Техніка, енергетика, транспорт АПК»*, 4(99). 18–23.

59. Алієв Е., Пацула О., Стрельченко Ю. (2017). Математична модель процесу роботи блока подачі насіння фотоелектронного сепаратора. *Інноваційні технології та інтенсифікація розвитку національного виробництва: матеріали IV міжнар. наук.-практ. конф. 30 листоп. 2017 р. Частина 1*. 219–220.

60. Алієв Е.Б. (2017). Модель системи фотоелектронного сепаратора насіннєвого матеріалу. *Вісник Степу. Науковий збірник. «Стан та перспективи розвитку агропромислового виробництва України»*, 14. 135-138.
61. El-Awady, M., Yehia, I., Ebaid, M., Arif, E. (2009). Development of rice cleaner for reduced impurities and losses. *Agricultural Mechanization in Asia, Africa and Latin America*. 15–20.
62. Simonyan, K., Mudiare, O., El-Okene, A., Yiljep, Y. (2010). Development of a mathematical model for predicting the cleaning efficiency of stationary grain threshers using dimensional analysis. *Applied Engineering in Agriculture*. 189–195.
63. Casandroi, T., Popescu, M., Voicu, G. (2009). Developing a mathematical model for simulating the seeds separation process on the plane sieves. *UPB Scientific Bulletin, Series D: Mechanical Engineering*. 17–28.
64. Yuan, J., Yu, T., Wang, K. (2006). A hybrid intelligent approach for optimal control of seed cleaner. *International Federation for Information Processing*. 780–785.
65. Panasiewicz, M., Sobczak, P., Mazur, J., Zawi'slak, K., Andrejko, D. (2012). The technique and analysis of the process of separation and cleaning grain materials. *Journal of Food Engineering*. 603–608.
66. Studman, C. (2001). Computers and electronics in postharvest technology – a review. *Computers and Electronics in Agriculture*, 30. 109–124.
67. Rodin E., Avula X. (1988). Mathematical and Computer Modelling. *Mathematical & Physical Sciences, Scholarly Journals*, 10(3). 523–527.
68. Balascio, C., Misra, M., Johnson, H. (1987). Particle movement and separation phenomena for a gravity separator: I. development of a markov probability model and estimation of model parameters. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers* 30. 1834–1839.
69. Shapiro, L., Stockman, G. (2001). *Computer Vision*. Seattle, Washington: Prentice Hall.
70. Sonka, M., Hlavac, V., Boyle, R. (2008). *Image Processing, Analysis, and Machine Vision*. Stamford: Cengage Learning.
71. Szeliski, R. (2010). *Computer Vision: Algorithms and Applications*. Springer.

72. Forsyth, D., Ponce, J. (2011). *Computer Vision, A Modern Approach*. New Jersey: Prentice Hall.
73. Dell'Aquila, A. (2007). Towards new computer imaging techniques applied to seed quality testing and sorting. *Seed Science and Technology*. 519–538.
74. Schmidt, L. (2007). Seed processing, in: *Tropical Forest Seed*. Springer Berlin Heidelberg. 67–142.
75. Desai, B. (2004). *Drying, cleaning, and upgrading. Seeds Handbook: Processing And Storage*. Rahuri, India: CRC Press.
76. Douik, A., Abdellaoui, M. (2010). Cereal grain classification by optimal features and intelligent classifiers. *International Journal of Computers, Communications and Control*. 506–516.
77. Chhabra, M., Reel P. (2011). Morphology based feature extraction and recognition for enhanced wheat quality evaluation. *Communications in Computer and Information Science, 168*. 41–50. DOI:10.1007/978-3-642-22606-9_8
78. Szczypinski, P., Zapotoczny, P. (2012). Computer vision algorithm for barley kernel identification, orientation estimation and surface structure assessment. *Computers and Electronics in Agriculture*. 32–38.
79. Xun, Y., Zhang, J., Li, W., Cai, W. (2006). Automatic system of seeds refined grading based on machine vision. *Intelligent Control and Automation, WCICA The Sixth World Congress on*. 9686 –9689.
80. Pearson, T. (2009). Hardware-based image processing for high-speed inspection of grains. *Computers and Electronics in Agriculture*. 12–18.
81. Pearson, R. (2006). Nonlinear empirical modeling techniques. *Computers & Chemical Engineering*. 1514–1528.
82. Keil, T. (2010). Separator for sorting of granules. Patent WO 2010/125528 A2, filed 28 April 2010, and issued 4 November 2010.
83. Алієв, Е. Б. (2018). Патент на корисну модель України 136828, МПК В07В 4/02 (2006.01). Адаптивний аеродинамічний сепаратор. Заявник: Інститут олійних культур Національної академії аграрних наук України, № u201902090. Заявл. 01.03.2019. Опубл. 10.09.2019, бюл. № 17.

84. Алієв, Е. Б. (2018). Патент на корисну модель України 136829, МПК (2006) В07В 13/18, (2006.01) В07В 4/00. Фотоелектронний сепаратор. Заявник: Інститут олійних культур Національної академії аграрних наук України, № u201902091. Заявл. 01.03.2019. Опубл. 10.09.2019, бюл. № 17.

85. Алієв, Е. Б. (2019). Патент України на винахід 120231, МПК (2006) А01С 1/00, G01В 11/00, G01В 11/02 (2006.01), G01N 21/25 (2006.01), G06Т 7/00. Спосіб автоматичного фенотипування насіння і пристрій для його здійснення. Заявник: Інститут олійних культур Національної академії аграрних наук України, № а201808708. Заявл. 25.10.2019. Опубл. 25.10.2019, бюл. № 20.

86. Алієв, Е. Б. (2019). Патент України на винахід 120235 , МПК (2006) В07В 1/00, В07В 1/40 (2006.01), В07В 1/42 (2006.01), G05В 13/00, G05В 15/00. Адаптивний віброрешітний сепаратор. Заявник: Інститут олійних культур Національної академії аграрних наук України, № а201811084. Заявл. 25.10.2019. Опубл. 25.10.2019, бюл. № 20.

87. Алієв, Е. Б. (2019). Патент України на винахід 120235 , МПК (2006) В07В 1/00, В07В 1/40 (2006.01), В07В 1/42 (2006.01), G05В 13/00, G05В 15/00. Адаптивний віброрешітний сепаратор. Заявник: Інститут олійних культур Національної академії аграрних наук України, № а201811084. Заявл. 25.10.2019. Опубл. 25.10.2019, бюл. № 20.

88. Shevchenko, I., Aliiev, E. (2018). Study of the process of calibration of confectionery sunflower seeds. *Food Science and Technology*, 12(4). 135–142.

89. Aliiev E. (2019). Justification of constructive-mode parameters of a photo-electron separator of sunflower seeds. *Scientific Horizons*, 5(78). 23–30. DOI: 10.33249/2663-2144-2019-78-5-23-30.

90. Aliiev E. (2019). Production testing of tape device for automatic phenotyping of sunflower seeds. *Scientific Horizons*, 12(85), 75–83. DOI: 10.33249/2663-2144-2019-85-12-75-83.

91. Aliiev E.B. (2020). Automatic Phenotyping Test of Sunflower Seeds. *Helia*. 43(72). 51–66. DOI: 10.1515/helia-2019-0019.

92. Shevchenko, I., Aliiev, E., Viselga, G., Kaminski, J. R. (2021). Modeling Separation Process for Sunflower Seed Mixture on Vibro-Pneumatic Separators. *Design and optimization of mechanical systems*, 27(4). 311–320. DOI: 10.5755/j02.mech.27647.
93. Комаристов В. (1977). Сельскохозяйственные машины. М.: Колос.
94. А. с. 1470361 В07В 13/02 Триер/А. П. Тарасенко, В. В. Василенко, В. Н. Солнцев, С. В. Василенко (СССР). №4235605/29-03; Заявл. 27.10.87; опубл. 07.04.89. Бюл. №13.
95. А. с. 1660774 В07В 13/02 Устройство для разделения материалов по крупности. М. С. Исламов (СССР). № 4641103/03 Заявл. 07.12.88; опубл. 07.07.91. Бюл. №25.
96. Гоголев Г. (1988). *Руководство по механизации селекционно-семеноводческих процессов*. М.: ВИМ.
97. Grochowicz, J. (1980). *Machines for cleaning and sorting of seeds*. Washington: U.S. Department of Agriculture and the National Science Foundation.
98. Fouad, H. (1980). The effect of cell configuration on length grading of beans. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 25. 391–406.
99. Berlage, A., Bilslan, D., Brandenburg, N., Cooper, T. (1984). Experimental indent cylinder for separating seeds. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers*, 27(2). 358–361
100. Churchill, D., Berlage, A., Bilslan, D., Cooper, T. (1989). Decision-support system development for conditioning seeds with indent cylinder. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers*, 32. 1395–1398.
101. Choon-Ki, L., Song, J., Yun, J., Seo, J., Lee, J., Kim, J., Jeong, G., Kim, C.K. (2009). The optimum operating conditions of indentedcylinder length grader to remove broken rice based on varietal characteristics. *Korean Journal of Crop Science*, 54. 366–374.
102. Huimin, W., Mingliang, W., Lun, T., Yong, L., Ping, D. (2011). Dynamic analysis to the seeds in indent of the indent cylinder separator. *International Conference on Intelligent Computation Technology and Automation (ICICTA)*. 66–70.

103. Sorica, C., Pirna, I., Bracacescu, C., Marin, E., Postelnicu, E. (2012). Cinematic analysis of particle of impurity in conditioning process of grains into indented cylinder separators. *Engineering for Rural Development*. 60–66.

104. Aliiev E., Lupko K. (2021). Prerequisites for the Creation of a Mechatronic System of Indented Cylinders for the Separation of Fine Seeds. *Scientific Horizons*. 24(3). 75–86. DOI: 10.48077/scihor.24(3).2021.75-86.

105. Алієв Е. Б., Лупко К. О. (2023). Патент України на корисну модель №152573. МПК В07В 1/08 (2006.01). Адаптивний селекційно-насінницький трієр. Заявник: Інститут олійних культур національної академії аграрних наук України, № u202201745. Заявл. 26.05.2022. Опубл. 15.03.2023, бюл. № 11.

106. Алієв Е.Б., Лупко К.О., Белка О.В., Алієва О.Ю. (2021). Трієрний сепаратор насінневого матеріалу дрібнонасінневих олійних культур. *Науково-технічний бюлетень Інституту олійних культур НААН*, 31. 118–132. DOI: 10.36710/ioc-2021-31-11.

107. Алієв Е. Б., Лупко К. О. (2020). Застосування трієрних сепараторів для очищення насіння дрібнонасінневих культур. *Матеріали XXI Міжнародної наукової конференції «Сучасні проблеми землеробської механіки» (17–18 жовтня 2020 р.)*, 116.

108. Васильєва О. П. (2000). *Повышение эффективности разделения зерновой смеси путем оптимизации параметров ρ режимов работы триера с переменной угловой скоростью вращения цилиндра*. (Диссертация кандидата технических наук: 05.20.01). Ижевск: ИГСХА.

109. Семенов В. (2012). *Процесс сепарирования в центробежном сепараторе с пульсирующим изменением скорости*. (Диссертация кандидата технических наук: 05.18.12). Калининград: ФГБОУ ВПО «КГТУ».

110. Бужгеев А. С. (2006). *Совершенствование технологического процесса и повышение производительности очистки зерна в дисковом триероовсюгоотборнике*. (Диссертация кандидата технических наук: 05.20.01). Улан-Удэ: ВСГТУ.

111. Сидоров И. А. (1997). *Разработка и обоснование параметров цилиндрического триера с принудительным удалением фракций из ячеек.* (Диссертация кандидата технических наук: 05.20.01). Курск: ВИМ, КГСХА.
112. Одинцов Д. В. (2007). *Повышение эффективности функционирования цилиндрического триера с полимерной ячеистой поверхностью путем обоснования основных параметров и режимов работы.* (Диссертация кандидата технических наук: 05.20.01). Москва: РГБ.
113. Алієв Е. Б. (2019). *Фізико-математичні моделі процесів прецизійної сепарації насінневого матеріалу соняшнику: монографія.* Запоріжжя: СТАТУС. ISBN 978-617-7759-32-3.
114. Shevchenko I., Aliiev E. (2018). Study of the process of calibration of confectionery sunflower seeds. *Food Science and Technology*, 12(4), 135–142.
115. Aliiev E., Gavrilchenko A., Tesliuk H., Tolstenko A., Koshul'ko V. (2019). Improvement of the sunflower seed separation process efficiency on the vibrating surface. *Acta Periodica Technologica, APTEFF*, 50, 12–22.
116. Pertti Broas. (2001). Advantages and problems of CAVE-visualisation for design purposes. *Trans. VTT Symposium Virtual prototyping. Espoo*, 73–81.
117. Bai C. (1996). *Modelling of spray impingement processes.* (Ph.D Thesis).
118. Dominik Kubicki, Simon Lo. (2012). Slurry transport in a pipeline – Comparison of CFD and DEM models. *Ninth International Conference on CFD in the Minerals and Process Industries.* 1–6.
119. Sang Won Han, Won Joo Lee, Sang Jun Lee. (2012). Study on the Particle Removal Efficiency of Multi Inner Stage Cyclone by CFD Simulation. *World Academy of Science, Engineering and Technology.* 6. 411–415.
120. Satish G., Ashok Kumar K., Vara Prasad V., Pasha Sk. M. (2013). Comparison of flow analysis of a sudden and gradual change of pipe diameter using fluent software. *IJRET: International Journal of Research in Engineering and Technology.* 2. 41–45.
121. Iguchi Manabu, Ilegbusi Olusegun J. (2014). *Basic Transport Phenomena in Materials Engineering.* Springer.

122. Иванец, В. Н., Бакин, И. А., Белоусов, Г. Н. (2002). Энтروпийный подход к оценке процесса смешивания сыпучих материалов. *Хранение и переработка сельскохозяйственного сырья. 11*. 16–18.
123. Бакин, И. А., Белоусов, Г. Н., Саблинский, А. И. (2001). Моделирование процесса смешивания энтропийно – информационным методом. Новые технологии в научных исследованиях в образовании. *Материалы Всероссийской научно-практической конференции. Ч. 1*.
124. Bai, C., Gosman, A. D. (1995). Development of methodology for spray impingement simulation. *SAE Technical Paper Series*.
125. Khalid M. Saqr, Hossam S. Aly, Mazlan A. Wahid, Mohsin M. Sies. (2009). Numerical Simulation of Confined Vortex Flow Using a Modified k-e Turbulence Model. *CFD Letters. 1(2)*. P. 87–94.
126. Wallin, S. (2000). *Engineering turbulence modeling for CFD with a focus on explicit algebraic Reynolds stress models*. (Doctoral thesis).
127. Aliiev E., Lupko K. (2022). Results of numerical modelling of the process of separation of seed material of small-seeded crops on a cylindrical cell trier. *Machinery & Energetics. 13(2)*. 9–19. DOI: 10.31548/machenergy2022.01.009.
128. Алієв Е. Б., Миколенко С. Ю., Сова Н. А., Алієва О. Ю., Малєгін Р. Д., Лупко К. О., Лінко М. О., Гезь Я. В., Безугла Л. С. (2022). *Техніко-технологічне забезпечення безвідходної переробки зернової сировини у харчові продукти і корми: колективна монографія*. Дніпро: ЛІРА.
129. Алієв Е. Б., Лупко К. О., Долгіх Д. О. (2022). Фізико-математична модель взаємодії компонентів насінневої суміші дрібнонасіневих олійних культур із робочим органом трієра. *Науково-технічний бюлетень Інституту олійних культур НААН, 32*. 123–131. DOI: 10.36710/ІОС-2022-32-12.
130. Лупко К. О. (2021). Сепарація насінневого матеріалу олійних культур на трієрах. *Олійні культури: сьогодення та перспективи. Збірник тез Міжнародної наукової інтернет-конференції*. 108–109.
131. Алієв Е. Б., Лупко К. О. (2022). Результати симуляції процесу сепарації насінневого матеріалу дрібнонасіневих культур на циліндричному чарунковому

трієрі при змінній частоті обертання. *Матеріали науково-практичної інтернет-конференції «Сучасні напрями та досягнення селекції і насінництва сільськогосподарських культур»*. 135–137.

132. Техніко-технологічне забезпечення комплексної безвідходної переробки рослинної сировини у біологічно цінні харчові продукти і кормові добавки: звіт про НДР (остаточний). МОН, ДДАЕУ; кер. Миколенко С.; вик.: Сова Н., Алієв Е., Безугла Л., Долгих Д., Алієва О., Піддубцева О., Плотка Л., Гезь Я., Тимчак Д., Худайбердієва К., Лупко К., Лінко М., Малегін Р. Дніпро, 2022. 452 с. № ДР 0120U100322.

133. Техніко-технологічне оснащення первинного насінництва олійних культур: звіт про НДР (проміжний). Етап 2022 р.: Розробити адаптивну механотронну систему цільового поділу та відбору насіннєвого матеріалу олійних культур за спадковими ознаками. НААН, ІОК НААН; кер. Алієв Е.; вик.: Поляков О., Пацула О., Белка О., Усова Н., Нікітенко Н., Цапик Т., Школова С., Лупко К., Доценко Є. Запоріжжя, 2022. 102 с. № ДР 0120U105450.

134. Алієв Е.Б., Лупко К. О. (2023). Методика симуляції процесу сепарації насіннєвого матеріалу дрібнонасіннєвих культур на циліндричному чарунковому трієрі. *Вібрації в техніці та технологіях*. 1(108). 36–44. DOI: 10.37128/2306-8744-2023-1-4.

135. Aliiev E., Lupko K., Kobets O. (2023). Development of adaptive seed-separation trier for small-seeded crops. *Bulletin of the Transilvania University of Brasov. Series II: Forestry. Wood Industry. Agricultural Food Engineering*. 6 (65), 1: 103–126. DOI: 10.31926/but.fwiafe.2023.16.65.1.8.

136. Mohsenin, N. N. (1980). *Physical properties of plant and animal materials*. New York: Gordon and Breach Science Publishers Inc.

137. Jain, R. K., Bal S. (1997). Properties of pearl millet. *Journal of Agricultural Engineering Research*. 85–91.

138. Sahay, K. M., Singh, K. K. (1994). *Unit operations in agricultural processing*. New Delhi: Vikas Publishing House Pvt Ltd.

139. Singh, K. K., Goswami, T. K. (1996). Physical properties of sunflower seeds. Physical properties of cumin seed. *J. Agric.* 64. 93–98.
140. Nimkar, M. P., Chattopadhyay, K. P. (2001). Some Physical properties of green gram. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 80(2). 183–189.
141. Ogunjimi L., Aviara N., Aregbesola O. (2002). Some engineering properties of locust bean seed. *Some engineering properties of locust bean seed. J. Food En*, 55. 95–99.
142. 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.
143. McGinnis, Peter M. (2005). *Biomechanics of sport and exercise*. Champaign, IL.
144. Шевченко І.А., Алієв Е.Б. (2017). Дослідження аеродинамічних властивостей насіння олійних культур. *Вісник аграрної науки*. 3(769). 63–65.
145. 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*. Запоріжжя: СТАТУС.
146. Мاستицкий, С. Э. (2009). *Методическое пособие по использованию программы Statistica при обработке данных биологических исследований*. Мн.: РУП “Институт рыбного хозяйства”.
147. Бакарджиєв, Р. О., Комаров, А. О. (2015). Попередня оцінка і обробка даних при регресійному аналізі. *Збірник наукових праць КНТУ. Техніка в с-г виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація*. 28. 255–260.
148. Любченко, Е. А., Чуднова, О. А. (2010). *Планирование эксперимента: учебное пособие. Часть 1*. Владивосток: Изд-во ТГЭУ.
149. Адлер Ю.П. (1976). *Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий*. М.: Наука.

150. Мельников С.В., Алешкин В.Р., Роцин П.М. (1980). *Планирование эксперимента в исследованиях сельскохозяйственных процессов*. Л: Колос.
151. Heyman J. (2019) TracTrac: a massive object tracking algorithm to measure earth surface dynamics. *Computers and Geosciences*, 128, 11–18, DOI: 10.1016/j.cageo.2019.03.007.
152. Heyman J., Boltenhagen P., Delannay, R., Valance A. (2017) Experimental investigation of high speed granular flows down inclines. *EPJ Web of Conferences* 140, DOI:10.1051/epjconf/201714003057
153. Heyman J., Ancey C. (2014) Tracking bed load particles in a steep flume. *RiverFlow*, CRC Press, 909–916. DOI:10.1201/b17133-123
154. Heyman J., Mettra F., Ma H.B., Ancey C. (2013) Statistics of bedload transport over steep slopes: Separation of time scales and collective motion. *Geophysical Research Letters* 40(1), 128–133. DOI: 10.1029/2012GL054280
155. Heyman J., Girault G., Guevel Y., Allery C., Hamdouni A., Cadou J. (2013) Computation of Hopf bifurcations coupling reduced order models and the Asymptotic Numerical Method. *Computers and Fluids*, 76, 73–85.
156. Jeeva S., Sivabalakrishnan M. (2015). Survey on Background Modeling and Foreground Detection for Real Time Video Surveillance. *Procedia Computer Science*, 50, 566–571.
157. Collins R., Lipton A., Kanade T., Fijiyoshi H., Duggins D., Tsin Y., ... Wixson L. (2001). A system for video surveillance and monitoring. *Proceedings of the IEEE*, 89, 1456–1477.
158. Van Droogenbroeck M., Barnich O. (2014). *A disruptive method for background subtraction*. Chapman and Hall/CRC.
159. Kaewtrakulpong P., Bowden R. (2002). An improved adaptive background mixture model for real-time tracking with shadow detection. *Video-Based Surveillance Systems*, 135–144.
160. Zivkovic Z., Heijden F. (2006). Efficient adaptive density estimation per image pixel for the task of background subtraction. *Pattern recognition letters*, 27(7), 773–780.

161. Shapiro L., Stockman G. (2001). *Computer Vision*. Prentice Hall.
162. Завгородній О., Левкін Д., Штонда О. (2022). Методи розрахунку параметрів технічних систем. *Міжнародний науково-технічний журнал «Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах»*. 2. 48–51. DOI: 10.31891/2219-9365-2022-70-2-6
163. Bouguet J. Y. (2001). Pyramidal Implementation of the Affine Lucas Kanade Feature Tracker Description of the Algorithm. *Intel Corporation*, 5, 1–10.
164. Бакарджиєв, Р. О., Комаров, А. О. (2015). Попередня оцінка і обробка даних при регресійному аналізі. *Збірник наукових праць КНТУ. Техніка в с-г виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація*, 28, 255–260.
165. Любченко, Е. А., Чуднова, О. А. (2010). *Планирование эксперимента: учебное пособие*. Владивосток: Изд-во ТГЭУ.
166. Лупко К. О. (2023). Методика проведення експериментальних досліджень процесу сепарації дрібнонасіньових культур на лабораторному циліндричному чарунковому трієрі. *Збірник тез Міжнародної наукової інтернет-конференції «Олійні культури: сьогодення та перспективи»* (21 березня 2023 р.). Запоріжжя. ІОК НААН. 129-130.
167. Лупко К. О. (2023). Алгоритм роботи системи розпізнавання траєкторій польоту насіння по відеозображенню. *Збірник матеріалів Міжнародної науково–практичної конференції «Зелене повоєнне відновлення продовольчих систем в Україні»*. (26 січня 2023 р.). Одеса. ІКОСГ НААН. 286-289.
168. 6. Алієв Е.Б., Лупко К. О. (2023). Результати експериментальних досліджень селекційно-насіньового трієра. *Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки*. ЦНТУ. 7 (38), II: 67–74. DOI: 10.32515/2664-262X.2023.7(38).2.67-74.
169. ДСТУ 4397 (2005). *Сільськогосподарська техніка. Методи економічного оцінювання техніки на етапі випробування*. Держспоживстандарт України.
170. ГСТУ 3-37-4-94 (1995). *Трактори та машини сільськогосподарські. Методи економічної оцінки*. Мінагрополітики України.

171. Остапенко, М. Н. (2017). Развитие методики экономической оценки сельскохозяйственных машин. *Экономика и организация инженерно-технических систем в АПК*. 2, 49–53.

172. Сорокин, Н. Т., Табашников, А. Т. (2015). Методика оценки экономической эффективности сельскохозяйственной техники. *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2, 41–44.

173. Данильченко, М. Г., Гладич, Б. Б., Гевко, Р. Б., Ткаченко, І. Г. (2001). *Експертноаналітична оцінка технологічних і економічних показників сільськогосподарської техніки*. Тернопіль: Економічна думка.

174. 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: 10.32838/2663-5941/2021.4/10

ДОДАТКИ

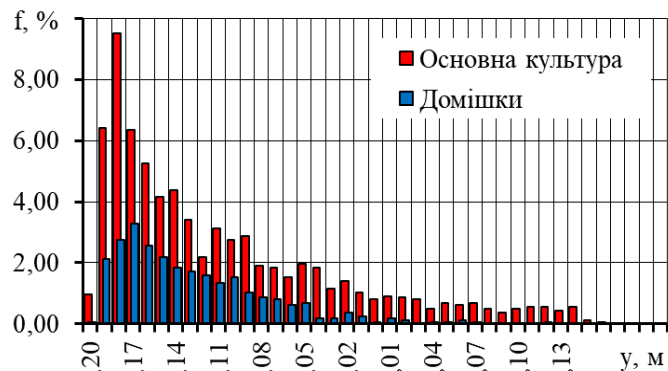
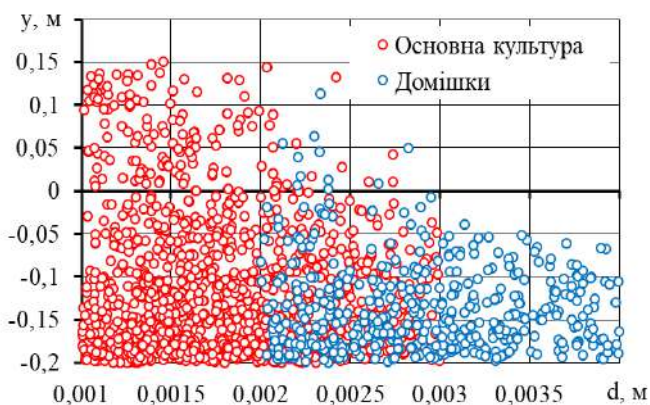
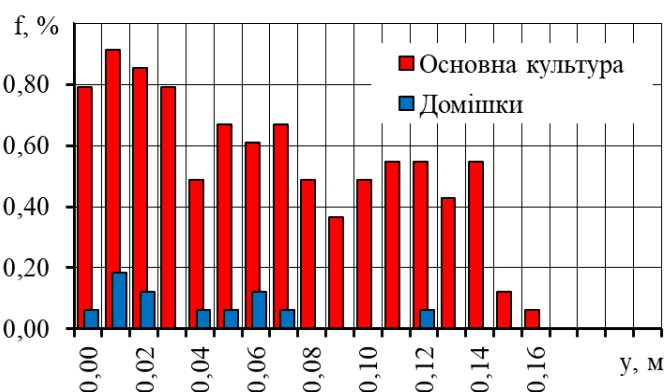
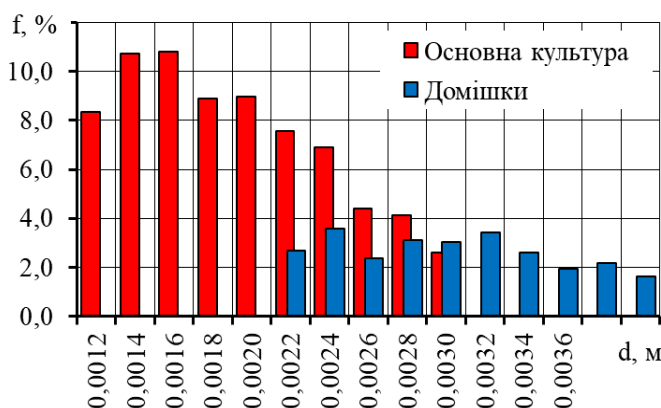
Додаток А

**Результати чисельного моделювання процесу сепарації насіннєвого матеріалу
дрібнонасіннєвих культур на селекційно-насінницькому трієрі**

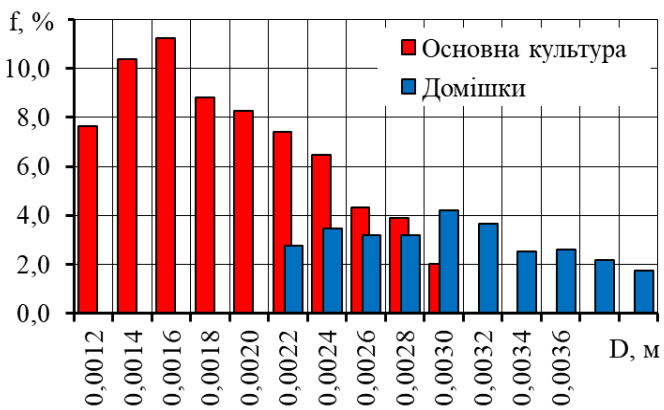
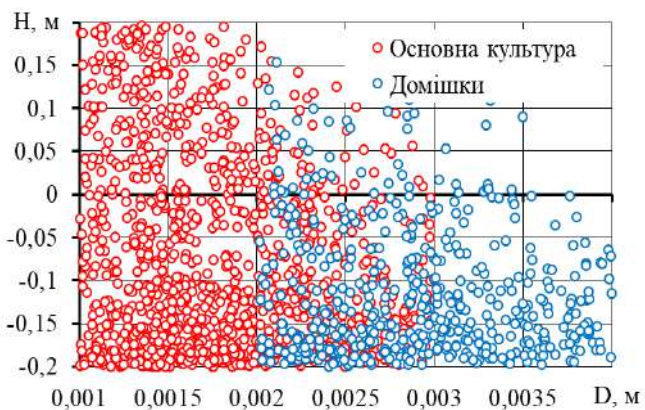
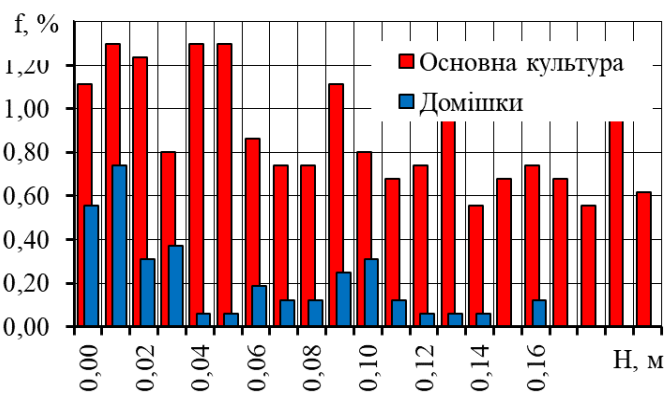
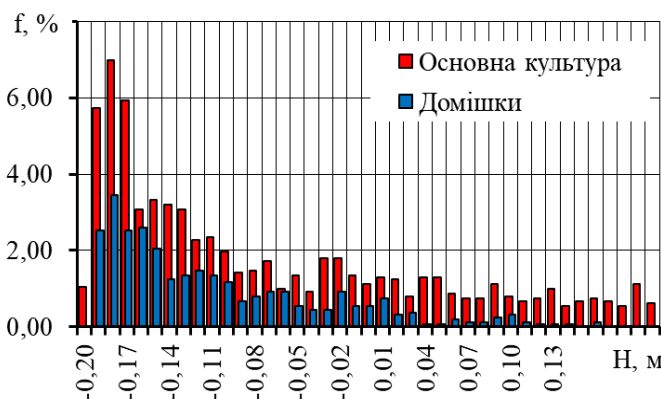
№	x ₁	x ₂	x ₃	D, м	n, об/хв.	N ₀ , шт.	θ _{min} , рад	θ _{max} , рад	N, шт.	ε, %
1	0	0	-0,5	0,4	45	2000	0,2615	0,9473	166	9,23
2	0	0	0	0,4	45	3000	0,3054	0,9473	215	12,09
3	0	0	-1	0,4	45	1000	0,2481	0,8681	133	10,53
4	0	0	0,5	0,4	45	4000	0,3736	0,8681	282	16,92
5	0	0	1	0,4	45	5000	0,4754	0,8681	370	22,43
6	0	-1	-1	0,4	30	1000	0,0500	0,4315	49	4,08
7	0	-1	-0,5	0,4	30	2000	0,0500	0,4315	51	3,92
8	0	-1	0	0,4	30	3000	0,0576	0,4176	57	6,28
9	0	-1	0,5	0,4	30	4000	0,1002	0,4315	66	10,61
10	0	-1	1	0,4	30	5000	0,2014	0,3776	94	29,79
11	0	1	-1	0,4	60	1000	0,4935	1,5908	210	16,43
12	0	1	-0,5	0,4	60	2000	0,5160	1,5908	349	14,88
13	0	1	0	0,4	60	3000	0,5736	1,5908	458	14,96
14	0	1	0,5	0,4	60	4000	0,6798	1,5908	587	15,99
15	0	1	1	0,4	60	5000	0,7976	1,5908	731	17,10
16	0	0,5	-1	0,4	52,5	1000	0,3481	1,2732	179	13,97
17	0	0,5	-0,5	0,4	52,5	2000	0,3647	1,2732	245	11,56
18	0	0,5	0	0,4	52,5	3000	0,4276	1,2698	334	12,17
19	0	0,5	0,5	0,4	52,5	4000	0,5024	1,2732	433	15,47
20	0	0,5	1	0,4	52,5	5000	0,6236	1,1398	578	20,36
21	0	-0,5	-1	0,4	37,5	1000	0,1506	0,6635	74	8,11
22	0	-0,5	-0,5	0,4	37,5	2000	0,1527	0,7024	104	6,77
23	0	-0,5	0	0,4	37,5	3000	0,1506	0,7176	126	10,38
24	0	-0,5	0,5	0,4	37,5	4000	0,2076	0,6524	151	16,54
25	0	-0,5	1	0,4	37,5	5000	0,3000	0,5800	197	26,35
26	-1	-1	-1	0,2	30	1000	0,1002	0,2214	17	30,88
27	-1	-1	-0,5	0,2	30	2000	0,1014	0,2247	118	30,88
28	-1	-1	0	0,2	30	3000	0,1100	0,2200	291	30,91
29	-1	-1	0,5	0,2	30	4000	0,1336	0,2436	400	30,50
30	-1	-1	1	0,2	30	5000	0,1336	0,2436	505	30,10
31	-1	-0,5	-1	0,2	37,5	1000	0,2014	0,4315	32	30,38
32	-1	-0,5	-0,5	0,2	37,5	2000	0,2247	0,4247	137	30,39
33	-1	-0,5	0	0,2	37,5	3000	0,3236	0,4436	340	30,24
34	-1	-0,5	0,5	0,2	37,5	4000	0,3000	0,4400	459	30,53
35	-1	-0,5	1	0,2	37,5	5000	0,3000	0,4400	534	30,09
36	-1	0	-1	0,2	45	1000	0,3047	0,6315	60	30,33
37	-1	0	-0,5	0,2	45	2000	0,3315	0,6635	172	30,30

38	-1	0	0	0,2	45	3000	0,4335	0,6635	363	30,10
39	-1	0	0,5	0,2	45	4000	0,5100	0,6600	498	30,62
40	-1	0	1	0,2	45	5000	0,5000	0,6600	578	29,93
41	-1	0,5	-1	0,2	52,5	1000	0,3647	0,7635	75	30,33
42	-1	0,5	-0,5	0,2	52,5	2000	0,4136	0,7635	251	30,70
43	-1	0,5	0	0,2	52,5	3000	0,4954	0,7954	386	30,54
44	-1	0,5	0,5	0,2	52,5	4000	0,6254	0,7673	547	30,94
45	-1	0,5	1	0,2	52,5	5000	0,6854	0,7954	645	29,77
46	-1	1	-1	0,2	60	1000	0,4547	0,9954	102	30,82
47	-1	1	-0,5	0,2	60	2000	0,4900	0,9700	283	30,61
48	-1	1	0	0,2	60	3000	0,5754	0,9473	459	29,87
49	-1	1	0,5	0,2	60	4000	0,7273	0,9473	614	29,57
50	-1	1	1	0,2	60	5000	0,8373	0,9473	745	29,92
51	1	-1	-1	0,6	30	1000	0,0333	0,5997	53	5,66
52	1	-1	-0,5	0,6	30	2000	0,0333	0,5825	72	3,94
53	1	-1	0	0,6	30	3000	0,0333	0,5755	69	2,90
54	1	-1	0,5	0,6	30	4000	0,0333	0,5954	78	4,41
55	1	-1	1	0,6	30	5000	0,0333	0,5436	79	14,59
56	1	-0,5	-1	0,6	37,5	1000	0,0833	0,7954	102	7,38
57	1	-0,5	-0,5	0,6	37,5	2000	0,0855	0,8432	114	4,65
58	1	-0,5	0	0,6	37,5	3000	0,1002	0,8432	121	4,31
59	1	-0,5	0,5	0,6	37,5	4000	0,1133	0,8432	143	6,10
60	1	-0,5	1	0,6	37,5	5000	0,1337	0,9473	167	13,19
61	1	0	-1	0,6	45	1000	0,1337	1,2236	149	9,38
62	1	0	-0,5	0,6	45	2000	0,1514	1,2236	197	5,08
63	1	0	0	0,6	45	3000	0,1837	1,2236	234	2,56
64	1	0	0,5	0,6	45	4000	0,2355	1,2236	257	5,89
65	1	0	1	0,6	45	5000	0,3398	1,2236	309	12,18
66	1	0,5	-1	0,6	52,5	1000	0,2333	1,5685	208	12,02
67	1	0,5	-0,5	0,6	52,5	2000	0,2625	1,5908	274	9,51
68	1	0,5	0	0,6	52,5	3000	0,3047	1,5908	356	6,62
69	1	0,5	0,5	0,6	52,5	4000	0,3855	1,5908	414	8,40
70	1	0,5	1	0,6	52,5	5000	0,5137	1,5908	510	11,22
71	1	1	-1	0,6	60	1000	0,3355	1,5908	222	15,77
72	1	1	-0,5	0,6	60	2000	0,3682	1,5936	349	7,92
73	1	1	0	0,6	60	3000	0,4482	1,5908	472	6,16
74	1	1	0,5	0,6	60	4000	0,5754	1,5908	589	7,10
75	1	1	1	0,6	60	5000	0,7297	1,5908	716	10,15

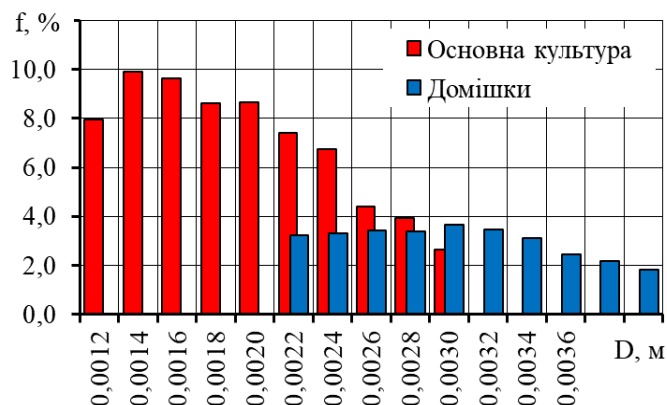
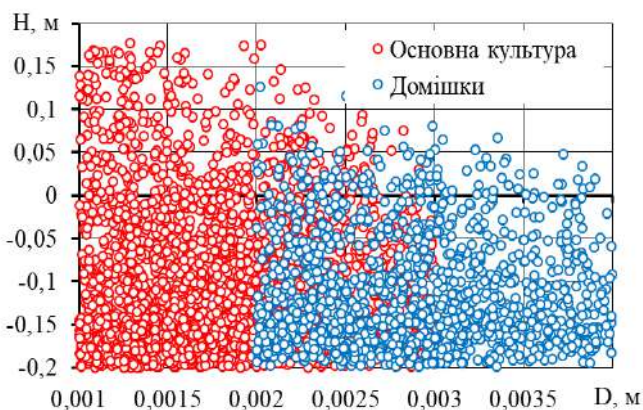
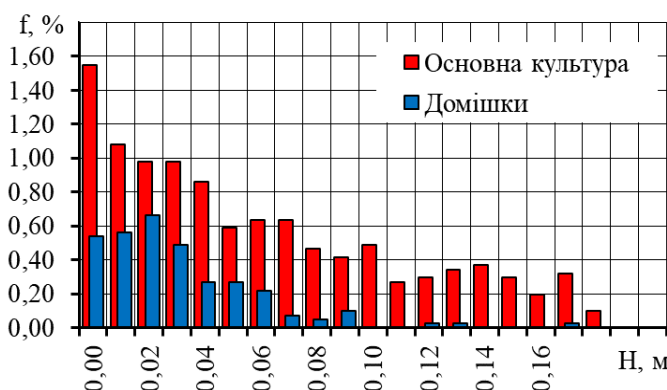
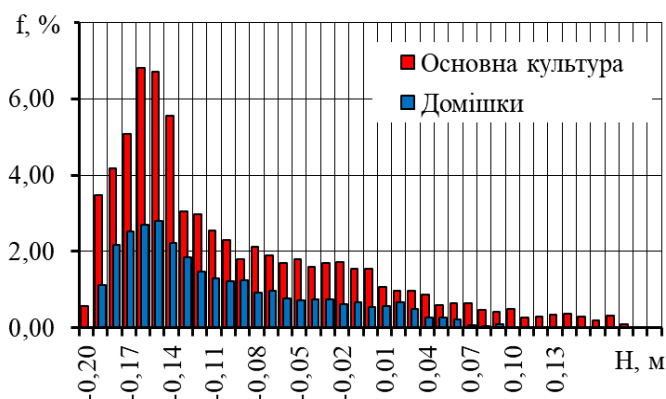
№ 1

Початок моделювання $t = 0$ сЕкспозиція $t = 20$ с

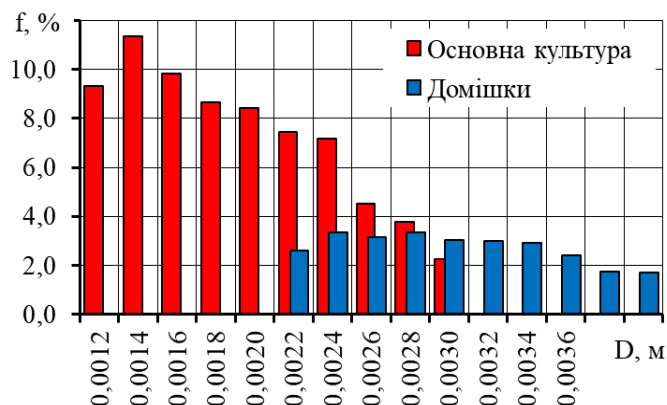
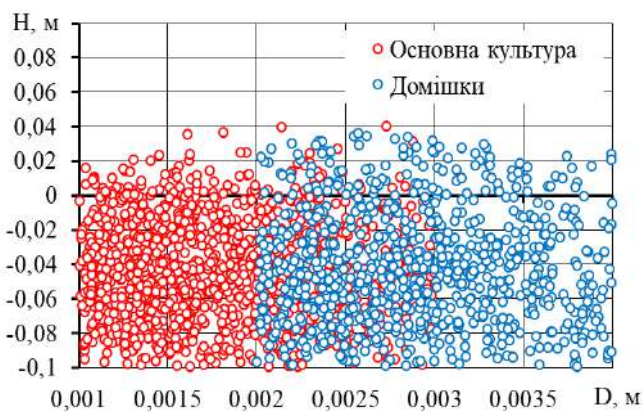
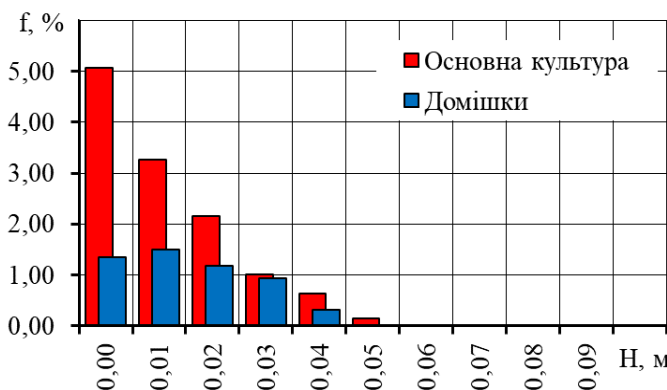
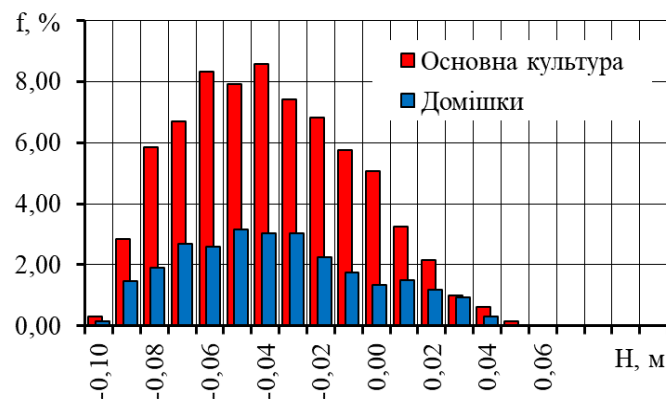
№ 10

Початок моделювання $t = 0$ сЕкспозиція $t = 20$ с

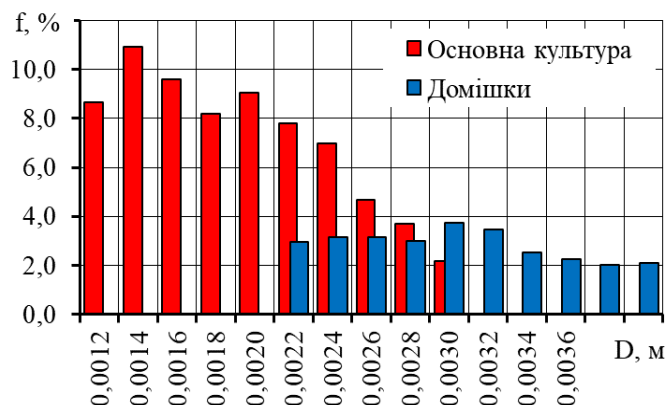
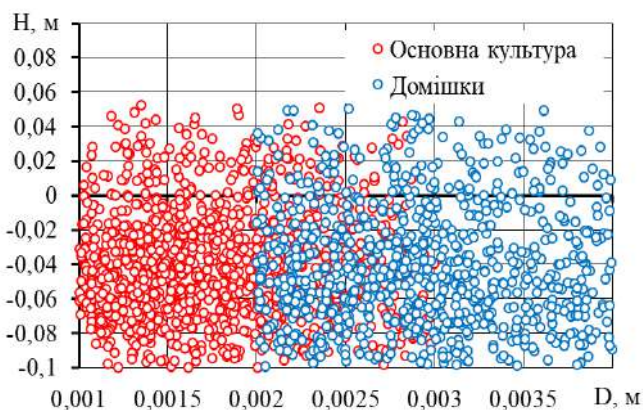
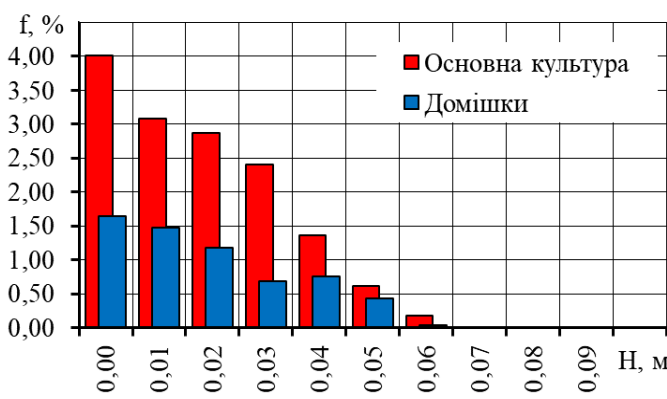
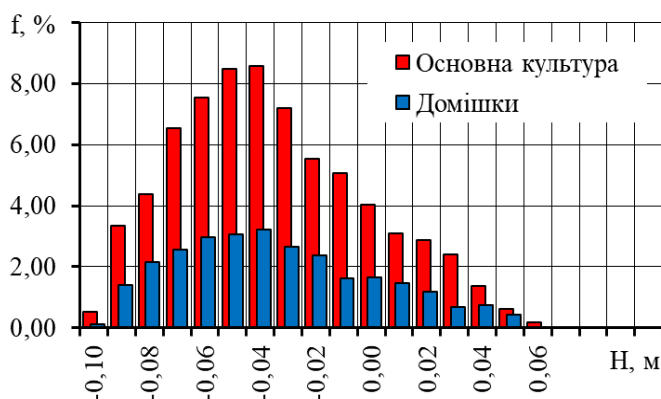
№ 20

Початок моделювання $t = 0$ сЕкспозиція $t = 20$ с

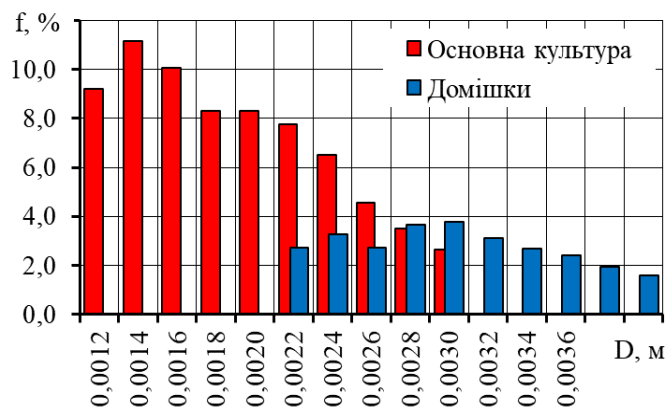
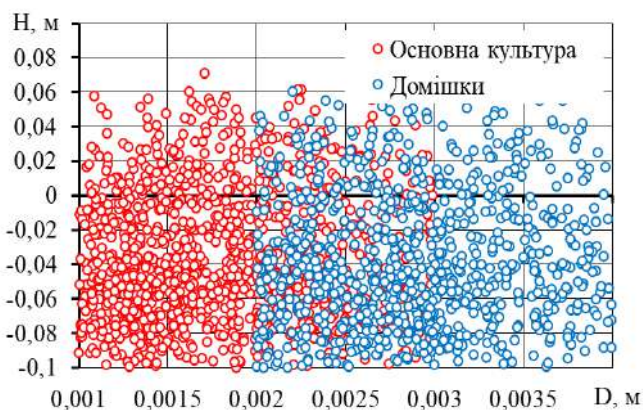
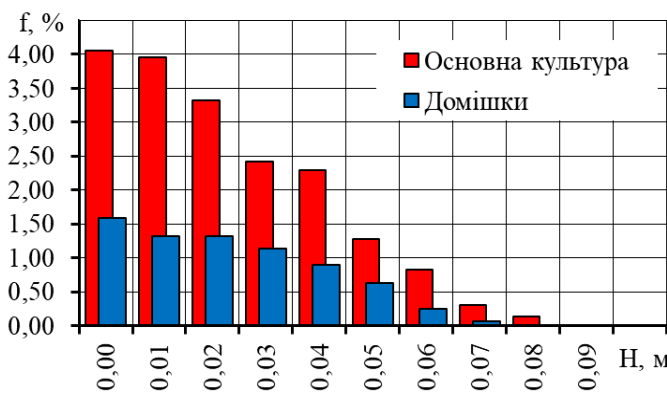
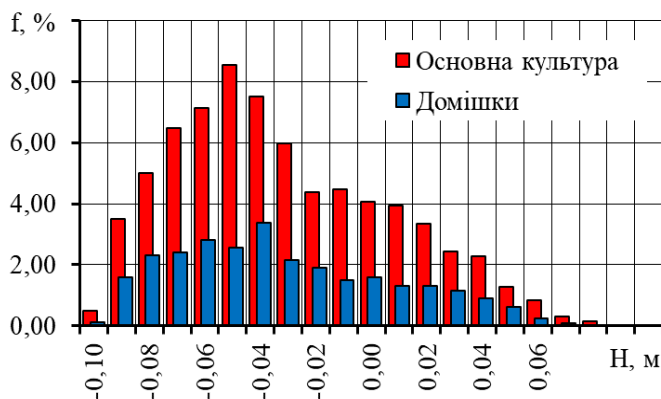
№ 30

Початок моделювання $t = 0$ сЕкспозиція $t = 20$ с

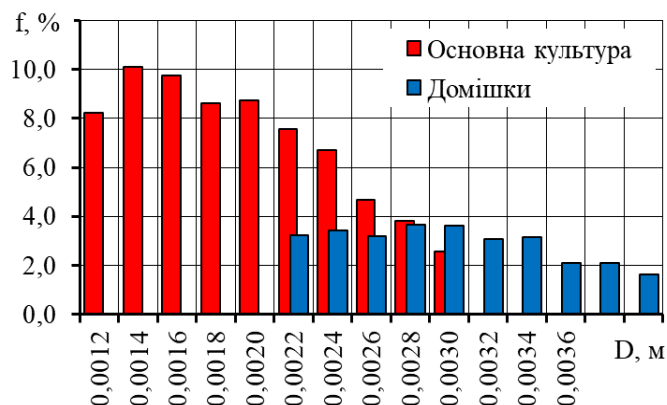
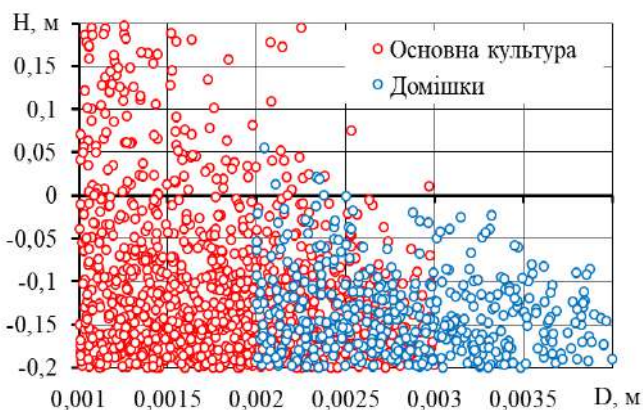
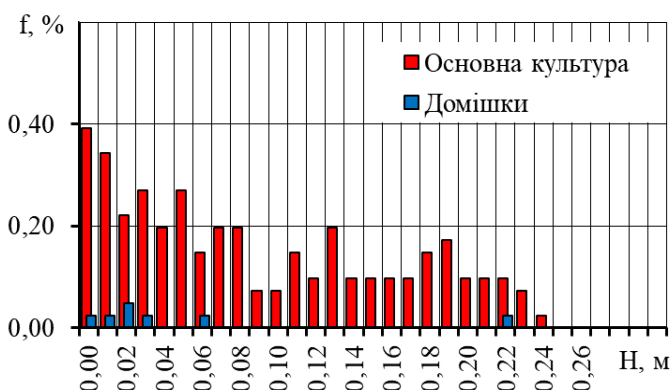
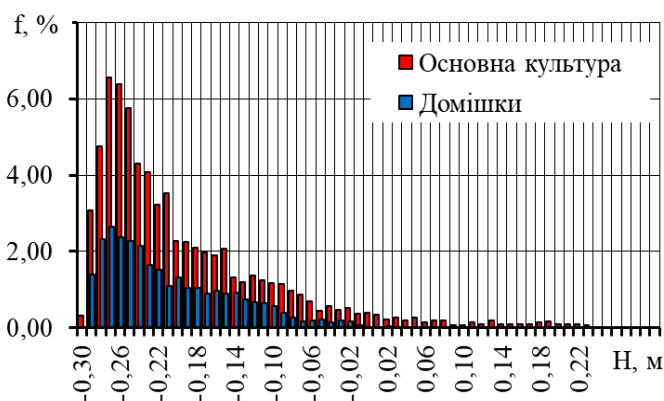
№ 40

Початок моделювання $t = 0$ сЕкспозиція $t = 20$ с

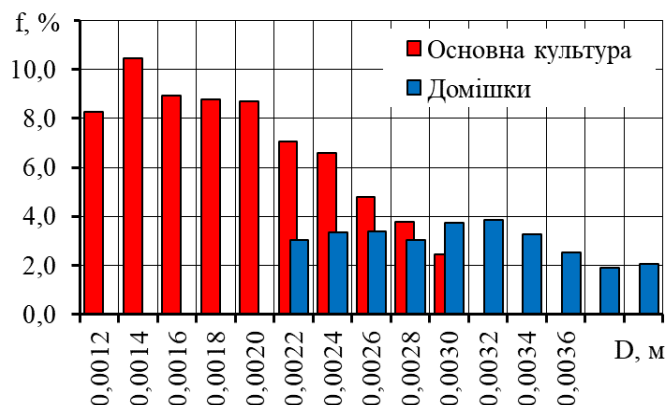
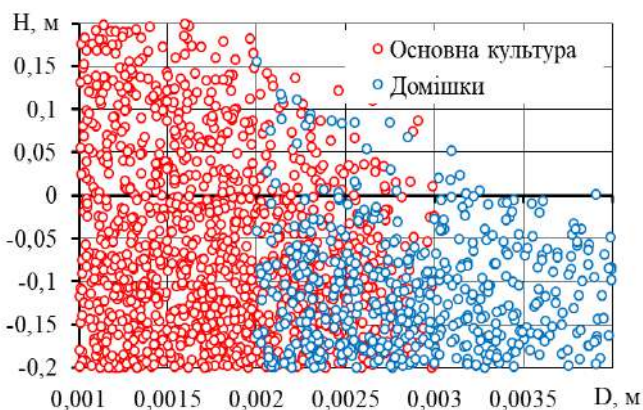
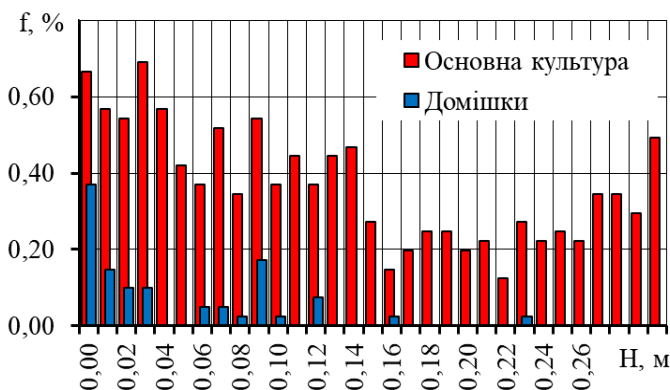
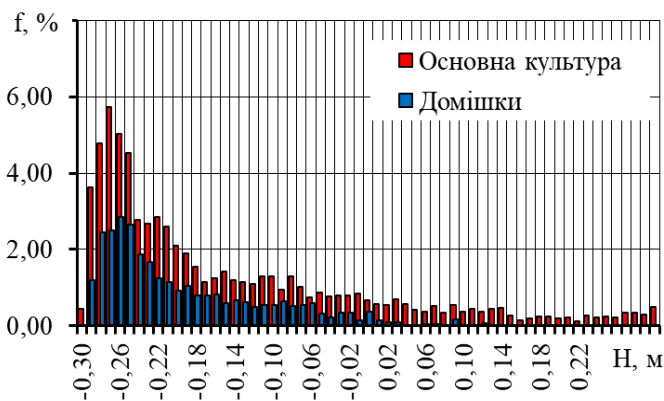
№ 50

Початок моделювання $t = 0$ сЕкспозиція $t = 20$ с

№ 60

Початок моделювання $t = 0$ сЕкспозиція $t = 20$ с

№ 70

Початок моделювання $t = 0$ сЕкспозиція $t = 20$ с

Додаток Б

Обробка даних чисельного моделювання в програмному пакеті Wolfram Cloud

Залежність значень мінімального θ_{min} і максимального θ_{max} значень кутів виходу насіння з чарунки циліндра трієра від факторів досліджень

M1 = { {0, 0, -0.5, 0.261516846067488}, {0, 0, 0, 0.305397496610753}, {0, 0, -1, 0.248062078981481}, {0, 0, 0.5, 0.373598775598299}, {0, 0, 1, 0.475397496610753}, {0, -1, -1, 0.0500208568057699}, {0, -1, -0.5, 0.0500208568057699}, {0, -1, 0, 0.0575711036455103}, {0, -1, 0.5, 0.10016742116156}, {0, -1, 1, 0.201357920790331}, {0, 1, -1, 0.493501108793284}, {0, 1, -0.5, 0.515985293814825}, {0, 1, 0, 0.573598775598299}, {0, 1, 0.5, 0.679769514998634}, {0, 1, 1, 0.797584436725356}, {0, 0.5, -1, 0.348062078981481}, {0, 0.5, -0.5, 0.364692654015398}, {0, 0.5, 0, 0.42757110364551}, {0, 0.5, 0.5, 0.502364237868743}, {0, 0.5, 1, 0.623598775598299}, {0, -0.5, -1, 0.150568272776686}, {0, -0.5, -0.5, 0.152680255142079}, {0, -0.5, 0, 0.150568272776686}, {0, -0.5, 0.5, 0.20757110364551}, {0, -0.5, 1, 0.3}, {-1, -1, -1, 0.10016742116156}, {-1, -1, -0.5, 0.101357920790331}, {-1, -1, 0, 0.11}, {-1, -1, 0.5, 0.133598775598299}, {-1, -1, 1, 0.133598775598299}, {-1, -0.5, -1, 0.201357920790331}, {-1, -0.5, -0.5, 0.224692654015398}, {-1, -0.5, 0, 0.323598775598299}, {-1, -0.5, 0.5, 0.3}, {-1, -0.5, 1, 0.3}, {-1, 0, -1, 0.304692654015398}, {-1, 0, -0.5, 0.331516846067488}, {-1, 0, 0, 0.433501108793284}, {-1, 0, 0.5, 0.51}, {-1, 0, 1, 0.5}, {-1, 0.5, -1, 0.364692654015398}, {-1, 0.5, -0.5, 0.413598775598299}, {-1, 0.5, 0, 0.495397496610753}, {-1, 0.5, 0.5, 0.625397496610753}, {-1, 0.5, 1, 0.685397496610753}, {-1, 1, -1, 0.454692654015397}, {-1, 1, -0.5, 0.49}, {-1, 1, 0, 0.575397496610753}, {-1, 1, 0.5, 0.727295218001612}, {-1, 1, 1, 0.837295218001612}, {1, -1, -1, 0.0333395092613021}, {1, -1, -0.5, 0.0333395092613021}, {1, -1, 0, 0.0333395092613021}, {1, -1, 0.5, 0.0333395092613021}, {1, -1, 1, 0.0333395092613021}, {1, -0.5, -1, 0.0833395092613021}, {1, -0.5, -0.5, 0.0855042367207998}, {1, -0.5, 0, 0.10016742116156}, {1, -0.5, 0.5, 0.113339509261302}, {1, -0.5, 1, 0.133731589409942}, {1, 0, -1, 0.133731589409942}, {1, 0, -0.5, 0.151357920790331}, {1, 0, 0, 0.183731589409942}, {1, 0, 0.5, 0.2355042367208}, {1, 0, 1, 0.339836909454122}, {1, 0.5, -1, 0.233339509261302}, {1,

0.5, -0.5, 0.262536244543856}, {1, 0.5, 0, 0.304692654015398}, {1, 0.5, 0.5, 0.3855042367208}, {1, 0.5, 1, 0.513731589409942}, {1, 1, -1, 0.335518122295591}, {1, 1, -0.5, 0.368188135979431}, {1, 1, 0, 0.448188135979431}, {1, 1, 0.5, 0.57542360798104}, {1, 1, 1, 0.729727656226966}};

M2 = {{0, 0, -0.5, 0.947295218001612}, {0, 0, 0, 0.947295218001612}, {0, 0, -1, 0.868062078981481}, {0, 0, 0.5, 0.868062078981481}, {0, 0, 1, 0.868062078981481}, {0, -1, -1, 0.431516846067488}, {0, -1, -0.5, 0.431516846067488}, {0, -1, 0, 0.41757110364551}, {0, -1, 0.5, 0.431516846067488}, {0, -1, 1, 0.37757110364551}, {0, 1, -1, 1.5907963267949}, {0, 1, -0.5, 1.5907963267949}, {0, 1, 0, 1.5907963267949}, {0, 1, 0.5, 1.5907963267949}, {0, 1, 1, 1.5907963267949}, {0, 0.5, -1, 1.27323589750338}, {0, 0.5, -0.5, 1.27323589750338}, {0, 0.5, 0, 1.26976951499863}, {0, 0.5, 0.5, 1.27323589750338}, {0, 0.5, 1, 1.13976951499863}, {0, -0.5, -1, 0.663501108793284}, {0, -0.5, -0.5, 0.702364237868743}, {0, -0.5, 0, 0.717584436725356}, {0, -0.5, 0.5, 0.652364237868743}, {0, -0.5, 1, 0.58}, {-1, -1, -1, 0.221357920790331}, {-1, -1, -0.5, 0.224692654015398}, {-1, -1, 0, 0.22}, {-1, -1, 0.5, 0.243598775598299}, {-1, -1, 1, 0.243598775598299}, {-1, -0.5, -1, 0.431516846067488}, {-1, -0.5, -0.5, 0.424692654015398}, {-1, -0.5, 0, 0.443598775598299}, {-1, -0.5, 0.5, 0.44}, {-1, -0.5, 1, 0.44}, {-1, 0, -1, 0.631516846067488}, {-1, 0, -0.5, 0.663501108793284}, {-1, 0, 0, 0.663501108793284}, {-1, 0, 0.5, 0.66}, {-1, 0, 1, 0.66}, {-1, 0.5, -1, 0.763501108793284}, {-1, 0.5, -0.5, 0.763501108793284}, {-1, 0.5, 0, 0.795397496610753}, {-1, 0.5, 0.5, 0.767295218001612}, {-1, 0.5, 1, 0.795397496610753}, {-1, 1, -1, 0.995397496610753}, {-1, 1, -0.5, 0.97}, {-1, 1, 0, 0.947295218001612}, {-1, 1, 0.5, 0.947295218001612}, {-1, 1, 1, 0.947295218001612}, {1, -1, -1, 0.599727656226966}, {1, -1, -0.5, 0.582536244543856}, {1, -1, 0, 0.575518122295591}, {1, -1, 0.5, 0.595397496610753}, {1, -1, 1, 0.543598775598299}, {1, -0.5, -1, 0.795397496610753}, {1, -0.5, -0.5, 0.843211977125876}, {1, -0.5, 0, 0.843211977125876}, {1, -0.5, 0.5, 0.843211977125876}, {1, 0, -1, 1.22358830623706}, {1, 0, -0.5, 1.22358830623706}, {1, 0, 0, 1.22358830623706}, {1, 0, 0.5, 1.22358830623706}, {1, 0, 1, 1.22358830623706}, {1, 0.5, -1, 1.56848150498885}, {1, 0.5, -0.5, 1.5907963267949}, {1, 0.5, 0, 1.5907963267949}, {1, 0.5, 0.5, 1.5907963267949}, {1, 0.5, 1, 1.5907963267949}, {1, 1, -1, 1.5907963267949}, {1, 1, -0.5, 1.59358830623706}, {1, 1, 0, 1.5907963267949}, {1, 1, 0.5, 1.5907963267949}, {1, 1, 1, 1.5907963267949}, {1, 1, 1, 1.5907963267949}};

```

1.5907963267949}}};
nlm1 = NonlinearModelFit[M1,
  a00 + a10 *x1 + a20 * x2 + a30 *x3 + a12* x1*x2 + a13 *x1*x3 +
  a23* x2*x3 + a11* x1^2 + a22 *x2^2 + a33 *x3^2, {a00, a10, a20,
  a30, a12, a13, a23, a11, a22, a33 }, {x1, x2, x3}];
"Закодоване повне"
Normal[nlm1]
"Критерій Стюдента"
nlm1["ParameterTable"]
nlm2 = NonlinearModelFit[M2,
  a00 + a10 *x1 + a20 * x2 + a30 *x3 + a12* x1*x2 + a13 *x1*x3 +
  a23* x2*x3 + a11* x1^2 + a22 *x2^2 + a33 *x3^2, {a00, a10, a20,
  a30, a12, a13, a23, a11, a22, a33 }, {x1, x2, x3}];
"Закодоване повне"
Normal[nlm2]
"Критерій Стюдента"
nlm2["ParameterTable"]
"Закодоване скорочене"
QQ1[x1_,x2_,x3_] :=0.31183837158579747` -0.07586910816367416` x1-
0.02522828332185391` x1^2+0.246915613808845` x2+0.10446544482078364`
x3+0.08142804412443433` x2 x3+0.03664881818231294` x3^2
QQ2[x1_,x2_,x3_] :=0.9895167633106713` +0.27743075706546066` x1-
0.07391167299119301` x1^2+0.49912924644038914` x2+0.09531949200211626` x1 x2
"Розкадоване скорочене"
x10=0.4;
dx1=0.2;
x20=45;
dx2=15;
x30=3000;
dx3=2000;
Q1 [D_,n_,N0_] := QQ1 [ (D - x10 )/ dx1 , (n - x20 )/ dx2 , (N0 - x30 )/ dx3 ];
Q2 [D_,n_,N0_] := QQ2 [ (D - x10 )/ dx1 , (n - x20 )/ dx2 , (N0 - x30 )/ dx3 ];
Expand[ Q1 [D,n,N0] ]
Expand[ Q2 [D,n,N0] ]
"Оптимум"
Opt=FindMinimum[{ Q1 [D_,n_,N0_ ],x10-dx1<=D<=x10+dx1,x20-
dx2<=n<=x20+dx2,x30-dx3<=N0<=x30+dx3},{D,x10-dx1},{n,x20-dx2},{N0,x30-dx3}]
Dopt=D/.Last[Opt];
nopt=n/.Last[Opt];
N0opt=N0/.Last[Opt];
"Графіки"
Plot3D[{Legended[ Q1[D_,n_,N0opt],Placed["θmin(N0" == N0opt
"шт.)",Bottom]],Legended[ Q2[D_,n_,N0opt],Placed["θmax(N0" == N0opt
"шт.)",Bottom]]},{D,x10-dx1,x10+dx1},{n,x20-dx2,x20+dx2},PlotStyle->{Green,

```

```

Orange}, AxesLabel->>{"D, м ", "n, об/хв. ", "θ, рад. "}, LabelStyle->Directive[FontSize->14, FontFamily->"Times"], Mesh->20, PlotTheme->"Detailed", PlotLegends->Automatic]
Plot3D[{Legended[ Q1[D ,nopt ,N0],Placed["θ_min(n" == nopt
"об/хв.)",Bottom]],Legended[ Q2[D ,nopt ,N0],Placed["θ_max(n" == nopt
"об/хв.)",Bottom]]}, {D,x10-dx1,x10+dx1}, {N0,x30-dx3,x30+dx3}, PlotStyle->{Green,
Orange}, AxesLabel->{"D, м ", "N0, шт. ", "θ, рад. "}, LabelStyle->Directive[FontSize->14, FontFamily->"Times"], Mesh->20, PlotTheme->"Detailed", PlotLegends->Automatic]
Plot3D[{Legended[ Q1[Dopt ,n ,N0],Placed["θ_min(D" == Dopt
"м)",Below]],Legended[ Q2[Dopt ,n ,N0],Placed["θ_max(D" == Dopt
"м)",Below]]}, {n,x20-dx2,x20+dx2}, {N0,x30-dx3,x30+dx3}, PlotStyle->{Green,
Orange}, AxesLabel->{"n, об/хв. ", "N0, шт. ", "θ, рад. "}, LabelStyle->Directive[FontSize->14, FontFamily->"Times"], Mesh->20, PlotTheme->"Detailed", PlotLegends->Automatic]

```

Залежність значень кількості всіх компонентів насіннєвої суміші N , які знаходилися в межах мінімального θ_{min} і максимального θ_{max} кутів повороту циліндру трієрного сепаратора від факторів досліджень

```

M={ {0,0,-0.5,166}, {0,0,0,215}, {0,0,-1,133}, {0,0,0.5,282}, {0,0,1,370}, {0,-1,-
1,49}, {0,-1,-0.5,51}, {0,-1,0,57}, {0,-1,0.5,66}, {0,-1,1,94}, {0,1,-1,210}, {0,1,-
0.5,349}, {0,1,0,458}, {0,1,0.5,587}, {0,1,1,731}, {0,0.5,-1,179}, {0,0.5,-
0.5,245}, {0,0.5,0,334}, {0,0.5,0.5,433}, {0,0.5,1,578}, {0,-0.5,-1,74}, {0,-0.5,-0.5,104}, {0,-
0.5,0,126}, {0,-0.5,0.5,151}, {0,-0.5,1,197}, {-1,-1,-1,17}, {-1,-1,-0.5,118}, {-1,-1,0,291}, {-
1,-1,0.5,400}, {-1,-1,1,505}, {-1,-0.5,-1,32}, {-1,-0.5,-0.5,137}, {-1,-0.5,0,340}, {-1,-
0.5,0.5,459}, {-1,-0.5,1,534}, {-1,0,-1,60}, {-1,0,-0.5,172}, {-1,0,0,363}, {-1,0,0.5,498}, {-
1,0,1,578}, {-1,0.5,-1,75}, {-1,0.5,-0.5,251}, {-1,0.5,0,386}, {-1,0.5,0.5,547}, {-
1,0.5,1,645}, {-1,1,-1,102}, {-1,1,-0.5,283}, {-1,1,0,459}, {-1,1,0.5,614}, {-1,1,1,745}, {1,-
1,-1,53}, {1,-1,-0.5,72}, {1,-1,0,69}, {1,-1,0.5,78}, {1,-1,1,79}, {1,-0.5,-1,102}, {1,-0.5,-
0.5,114}, {1,-0.5,0,121}, {1,-0.5,0.5,143}, {1,-0.5,1,167}, {1,0,-1,149}, {1,0,-
0.5,197}, {1,0,0,234}, {1,0,0.5,257}, {1,0,1,309}, {1,0.5,-1,208}, {1,0.5,-
0.5,274}, {1,0.5,0,356}, {1,0.5,0.5,414}, {1,0.5,1,510}, {1,1,-1,222}, {1,1,-
0.5,349}, {1,1,0,472}, {1,1,0.5,589}, {1,1,1,716} };
nlm=NonlinearModelFit[M,a00+a10 *x1+a20 * x2+a30 *x3+a12* x1*x2+a13
*x1*x3+a23* x2*x3+a11* x1^2+a22 *x2^2+a33 *x3^2,{a00,a10,a20,a30,a12,a13,
a23,a11,a22,a33 },{x1,x2,x3}];
"Закодоване повне"
Normal[nlm]
"Критерій Стюдента"
nlm["ParameterTable"]
"Закодоване скорочене"
QQ[x1_,x2_,x3_] :=235.7314285714287` -47.140000000000008`
x1+47.739999999999978` x1^2+165.44` x2+59.259999999999987` x1

```

```

x2+29.866666666666621` x2^2+170.960000000000012` x3-88.59999999999997` x1
x3+90.613333333333319` x2 x3
"Розкадоване скорочене"
x10=0.4;
dx1=0.2;
x20=45;
dx2=15;
x30=3000;
dx3=2000;
Q [D _ ,n _ ,N0 _ ] := QQ [ (D - x10) / dx1 , (n - x20) / dx2 , (N0 - x30) / dx3 ] ;
Expand[ Q [D ,n ,N0 ] ]
"Оптимум"
Opt=FindMaximum[{ Q [D ,n ,N0 ],x10-dx1<=D<=x10+dx1,x20-
dx2<=n<=x20+dx2,x30-dx3<=N0<=x30+dx3},{D,x10-dx1},{n,x20-dx2},{N0,x30-dx3}]
Dopt=D/.Last[Opt];
nopt=n/.Last[Opt];
N0opt=N0/.Last[Opt];
"Графіки"
Plot3D[{Legended[ Q[D ,n ,N0opt],Placed["N0" == N0opt
"шт.",Bottom]]},{D,x10-dx1,x10+dx1},{n,x20-dx2,x20+dx2},PlotStyle->{Green},
AxesLabel->{"D, м ","n, об/хв. ","N, шт. "},LabelStyle->Directive[FontSize-
>14,FontFamily->"Times"],Mesh->20,PlotTheme->"Detailed",PlotLegends->Automatic]
Plot3D[{Legended[ Q[D ,nopt ,N0],Placed["n" == nopt
"об/хв.",Bottom]]},{D,x10-dx1,x10+dx1},{N0,x30-dx3,x30+dx3},PlotStyle->{Green},
AxesLabel->{"D, м ","N0, шт. ","N, шт. "},LabelStyle->Directive[FontSize-
>14,FontFamily->"Times"],Mesh->20,PlotTheme->"Detailed",PlotLegends->Automatic]
Plot3D[{Legended[ Q[Dopt ,n ,N0],Placed["D" == Dopt "м",Below]]},{n,x20-
dx2,x20+dx2},{N0,x30-dx3,x30+dx3},PlotStyle->{Green}, AxesLabel->{"n, об/хв.
","N0, шт. ","N, шт. "},LabelStyle->Directive[FontSize->14,FontFamily-
>"Times"],Mesh->20,PlotTheme->"Detailed",PlotLegends->Automatic]

```

Залежність відносного вмісту домішок ε в насіннєвій суміші, яка знаходилася в межах мінімального θ_{min} і максимального θ_{max} кутів повороту циліндру трієрного сепаратора від факторів

```

M = {{0, 0, -0.5, 9.2289156626506}, {0, 0, 0, 12.093023255814}, {0,
0, -1, 10.5263157894737}, {0, 0, 0.5, 16.9219858156028}, {0, 0, 1,
22.4324324324324}, {0, -1, -1, 4.08163265306122}, {0, -1, -0.5,
3.92156862745098}, {0, -1, 0, 6.28070175438597}, {0, -1, 0.5,
10.6060606060606}, {0, -1, 1, 29.7872340425532}, {0, 1, -1,
16.4285714285714}, {0, 1, -0.5, 14.8774373259053}, {0, 1, 0,
14.958904109589}, {0, 1, 0.5, 15.9914821124361}, {0, 1, 1,

```

```

17.0998632010944}, {0, 0.5, -1, 13.9664804469274}, {0, 0.5, -0.5,
11.55555555555556}, {0, 0.5, 0, 12.1694915254237}, {0, 0.5, 0.5,
15.4681933842239}, {0, 0.5, 1, 20.356401384083}, {0, -0.5, -1,
8.10810810810811}, {0, -0.5, -0.5, 6.76923076923077}, {0, -0.5, 0,
10.377358490566}, {0, -0.5, 0.5, 16.5430463576159}, {0, -0.5, 1,
26.3502538071066}, {-1, -1, -1, 30.8823529411765}, {-1, -1, -0.5,
30.8823529411765}, {-1, -1, 0, 30.9088319088319}, {-1, -1, 0.5,
30.5}, {-1, -1, 1, 30.0990099009901}, {-1, -0.5, -1, 30.375}, {-1,
-0.5, -0.5, 30.3868613138686}, {-1, -0.5, 0,
30.2380952380952}, {-1, -0.5, 0.5, 30.5336787564767}, {-1, -0.5,
1, 30.0861423220974}, {-1, 0, -1, 30.3333333333333}, {-1, 0, -0.5,
30.3023255813954}, {-1, 0, 0, 30.1016166281755}, {-1, 0, 0.5,
30.6238244514107}, {-1, 0, 1, 29.9307958477509}, {-1, 0.5, -1,
30.3333333333333}, {-1, 0.5, -0.5, 30.7011952191235}, {-1, 0.5, 0,
30.544776119403}, {-1, 0.5, 0.5, 30.9414225941423}, {-1, 0.5, 1,
29.7674418604651}, {-1, 1, -1, 30.8235294117647}, {-1, 1, -0.5,
30.6148409893993}, {-1, 1, 0, 29.8747763864043}, {-1, 1, 0.5,
29.566757493188}, {-1, 1, 1, 29.9194630872483}, {1, -1, -1,
5.66037735849057}, {1, -1, -0.5, 3.94444444444444}, {1, -1, 0,
2.89855072463768}, {1, -1, 0.5, 4.41025641025641}, {1, -1, 1,
14.5949367088608}, {1, -0.5, -1,
7.38235294117647}, {1, -0.5, -0.5, 4.64516129032258}, {1, -0.5, 0,
4.30578512396694}, {1, -0.5, 0.5, 6.0979020979021}, {1, -0.5, 1,
13.1916167664671}, {1, 0, -1, 9.38255033557047}, {1, 0, -0.5,
5.0761421319797}, {1, 0, 0, 2.56410256410256}, {1, 0, 0.5,
5.88599348534202}, {1, 0, 1, 12.1779935275081}, {1, 0.5, -1,
12.0192307692308}, {1, 0.5, -0.5, 9.51315789473684}, {1, 0.5, 0,
6.62280701754386}, {1, 0.5, 0.5, 8.3956043956044}, {1, 0.5, 1,
11.2156862745098}, {1, 1, -1, 15.7657657657658}, {1, 1, -0.5,
7.9155672823219}, {1, 1, 0, 6.16334661354582}, {1, 1, 0.5,
7.10396975425331}, {1, 1, 1, 10.1508379888268}}];

```

```
nlm = NonlinearModelFit[M,
```

```

a00 + a10 *x1 + a20 * x2 + a30 *x3 + a12* x1*x2 + a13 *x1*x3 +
a23* x2*x3 + a11* x1^2 + a22 *x2^2 + a33 *x3^2, {a00, a10, a20,
a30, a12, a13, a23, a11, a22, a33 }, {x1, x2, x3}];

```

```
"Закодоване повне"
```

```
Normal[nlm]
```

```
"Критерій Стюдента"
```

```
nlm["ParameterTable"]
```

```
"Закодоване скорочене"
```

```

QQ[x1_,x2_,x3_] :=11.917613822275966` -11.243752359837668`
x1+5.251108000695444` x1^2+1.2503171766290824` x2+2.2858369300929824` x3-
2.9288993397877245` x2 x3+4.120548911826816` x3^2

```

```
"Розкадоване скорочене"
```

```
x10=0.4;
```

```

dx1=0.2;
x20=45;
dx2=15;
x30=3000;
dx3=2000;
Q [D _ ,n _ ,N0 _ ] := QQ [ (D - x10 )/ dx1 , (n - x20 )/ dx2 , (N0 - x30 )/ dx3 ] ;
Expand[ Q [D ,n ,N0 ] ]
"Оптимум"
Opt=FindMinimum[{ Q [D ,n ,N0 ],x10-dx1<=D<=x10+dx1,x20-
dx2<=n<=x20+dx2,x30-dx3<=N0<=x30+dx3},{D,x10-dx1},{n,x20-dx2},{N0,x30-dx3}]
Dopt=D/.Last[Opt];
nopt=n/.Last[Opt];
N0opt=N0/.Last[Opt];
"Графіки"
Plot3D[{Legended[ Q[D ,n ,N0opt],Placed["N0" == N0opt
"шт.",Bottom]]},{D,x10-dx1,x10+dx1},{n,x20-dx2,x20+dx2},PlotStyle->{Orange},
AxesLabel->{"D, м ","n, об/хв. ","ε, % "},LabelStyle->Directive[FontSize-
>14,FontFamily->"Times"],Mesh->20,PlotTheme->"Detailed",PlotLegends->Automatic]
Plot3D[{Legended[ Q[D ,nopt ,N0],Placed["n" == nopt
"об/хв.",Bottom]]},{D,x10-dx1,x10+dx1},{N0,x30-dx3,x30+dx3},PlotStyle->{Orange},
AxesLabel->{"D, м ","N0, шт. ","ε, % "},LabelStyle->Directive[FontSize-
>14,FontFamily->"Times"],Mesh->20,PlotTheme->"Detailed",PlotLegends->Automatic]
Plot3D[{Legended[ Q[Dopt ,n ,N0],Placed["D" == Dopt "м",Below]]},{n,x20-
dx2,x20+dx2},{N0,x30-dx3,x30+dx3},PlotStyle->{Orange}, AxesLabel->{"n, об/хв.
","N0, шт. ","ε, % "},LabelStyle->Directive[FontSize->14,FontFamily->"Times"],Mesh-
>20,PlotTheme->"Detailed",PlotLegends->Automatic]

```

Вирішення компромісної задачі

```

NN[x1_,x2_,x3_]:=235.7314285714287` -47.14000000000008`
x1+47.73999999999978` x1^2+165.44` x2+59.25999999999987` x1
x2+29.86666666666621` x2^2+170.96000000000012` x3-88.59999999999997` x1
x3+90.61333333333319` x2 x3
EE[x1_,x2_,x3_]:=11.917613822275966` -11.243752359837668`
x1+5.251108000695444` x1^2+1.2503171766290824` x2+2.2858369300929824` x3-
2.9288993397877245` x2 x3+4.120548911826816` x3^2
QQ1[x1_,x2_,x3_]:=0.31183837158579747` -0.07586910816367416` x1-
0.02522828332185391` x1^2+0.246915613808845` x2+0.10446544482078364`
x3+0.08142804412443433` x2 x3+0.03664881818231294` x3^2
QQ2[x1_,x2_,x3_]:=0.9895167633106713` +0.27743075706546066` x1-
0.07391167299119301` x1^2+0.49912924644038914` x2+0.09531949200211626` x1 x2
x10=0.4;
dx1=0.2;

```

```

x20=45;
dx2=15;
x30=3000;
dx3=2000;
N1 [D _ ,n _ ,N0 _ ] := NN [ (D - x10) / dx1 , (n - x20) / dx2 , (N0 - x30) / dx3 ] ;
E1 [D _ ,n _ ,N0 _ ] := EE [ (D - x10) / dx1 , (n - x20) / dx2 , (N0 - x30) / dx3 ] ;
Q1 [D _ ,n _ ,N0 _ ] := QQ1 [ (D - x10) / dx1 , (n - x20) / dx2 , (N0 - x30) / dx3 ] ;
Q2 [D _ ,n _ ,N0 _ ] := QQ2 [ (D - x10) / dx1 , (n - x20) / dx2 , (N0 - x30) / dx3 ] ;
"Оптимум"
Opt=FindMinimum[{E1 [D ,n ,N0 ] / N1 [D ,n ,N0 ],x10-dx1<=D<=x10+dx1,x20-
dx2<=n<=x20+dx2,x30-dx3<=N0<=x30+dx3},{D,x10-dx1},{n,x20-dx2},{N0,x30-dx3}]
Dopt=D/.Last[Opt];
nopt=n/.Last[Opt];
N0opt=N0/.Last[Opt];
N1 [D opt ,n opt ,N0 opt ]
E1 [D opt ,n opt ,N0 opt ]
Q1 [D opt ,n opt ,N0 opt ]
Q2 [D opt ,n opt ,N0 opt ]

```

Додаток В

Результати чисельного моделювання процесу сепарації насіннєвого матеріалу дрібнонасіннєвих культур на селекційно-насінницькому трієрі при змінній частоті обертання

№	x ₄	x ₅	T _L , с	T _R , с	t, с	N _i , шт				Q, шт/с	ε _i , %			
						1	2	3	Сер.		1	2	3	Сер.
1	-1	-1	15	1	16	972	988	1005	988	81.0	3,8	4,0	4,7	4,1
2	-1	0	15	2	17	1005	1022	1034	1020	71.8	3,6	3,9	4,5	4,0
3	-1	1	15	3	18	996	996	999	997	62.3	3,7	3,3	3,6	3,6
4	0	-1	25	1	26	1822	1838	1856	1839	82.8	4,6	4,8	5,4	4,9
5	0	0	25	2	27	1810	1819	1843	1824	75.4	4,3	4,5	5,1	4,6
6	0	1	25	3	28	1834	1834	1857	1842	70.5	4,4	4,0	4,7	4,4
7	1	-1	35	1	36	1934	1953	1972	1953	60.4	6,2	6,7	7,2	6,7
8	1	0	35	2	37	1956	1970	1980	1969	57.5	6,1	6,4	6,6	6,4
9	1	1	35	3	38	1947	1959	1970	1959	54.1	6,0	6,1	6,8	6,3

Додаток Г

Обробка даних чисельного моделювання в програмному пакеті Wolfram Cloud

Залежність кількості насінин і домішок N_i в насіннєвій суміші лотка від факторів досліджень

```

M={{-1,-1,988.3333333333333},{-1,0,1020.3333333333333},{-1,1,997},{0,-
1,1838.6666666666667},{0,0,1824},{0,1,1841.6666666666667},{1,-
1,1953},{1,0,1968.6666666666667},{1,1,1958.6666666666667}};
nlm=NonlinearModelFit[M,a00+a10 *x1+a20 * x2+a12* x1*x2+a11* x1^2+a22
*x2^2,{a00,a10,a20,a12,a11,a22 },{x1,x2}];
"Закодоване повне"
Normal[nlm]
"Критерій Стюдента"
nlm["ParameterTable"]
QQ[x1_,x2_] :=1840.185185185187' +479.11111111111126' x1-
353.77777777777792' x1^2
"Розкадоване скорочене"
x10=20;
dx1=10;
x20=4;
dx2=2;
Q [TL_,TR_] := QQ [ (TL - x10) / dx1 , (TR - x20) / dx2 ];
Expand[ Q [TL,TR ] ]
"Оптимум"
Opt=FindMaximum[{ Q [TL,TR ],x10-dx1<=TL<=x10+dx1,x20-
dx2<=TR<=x20+dx2},{TL,x10-dx1},{TR,x20-dx2}]
TLOpt=TL/.Last[Opt];
TROpt=TR/.Last[Opt];
"Графіки"
Plot3D[ Q [TL,TR ],{TL,x10-dx1,x10+dx1},{TR,x20-dx2,x20+dx2},PlotStyle-
>{Green}, AxesLabel->{"TL, с ","TR, с ","Ni, шт. "},LabelStyle->Directive[FontSize-
>14,FontFamily->"Times"],Mesh->20,PlotTheme->"Detailed",PlotLegends->Automatic]

```

Залежність відносного вмісту домішок ε_i в насіннєвій суміші лотка від факторів досліджень

```

M={{-1,-1,4.14761904761905},{-1,0,3.98095238095238},{-
1,1,3.56190476190476},{0,-

```

```

1,4.91428571428571},{0,0,4.62380952380952},{0,1,4.3952380952381},{1,-
1,6.68095238095238},{1,0,6.38571428571429},{1,1,6.31904761904762}};
nlm=NonlinearModelFit[M,a00+a10 *x1+a20 * x2+a12* x1*x2+a11* x1^2+a22
*x2^2,{a00,a10,a20,a12,a11,a22 },{x1,x2}];
"Закодоване повне"
Normal[nlm]
"Критерій Стюдента"
nlm["ParameterTable"]
QQ[x1_,x2_] :=4.640211640211641` +1.2825396825396835`
x1+0.5349206349206365` x1^2-0.244444444444444344` x2
"Розкадоване скорочене"
x10=20;
dx1=10;
x20=4;
dx2=2;
Q [TL_,TR_] := QQ [ (TL - x10) / dx1 , (TR - x20) / dx2 ] ;
Expand[ Q [TL,TR ] ]
"Оптимум"
Opt=FindMinimum[{ Q [TL,TR ],x10-dx1<=TL<=x10+dx1,x20-
dx2<=TR<=x20+dx2},{TL,x10-dx1},{TR,x20-dx2}]
TLOpt=TL/.Last[Opt];
TROpt=TR/.Last[Opt];
"Графіки"
Plot3D[ Q [TL,TR ],{TL,x10-dx1,x10+dx1},{TR,x20-dx2,x20+dx2},PlotStyle-
>{Orange}, AxesLabel->{"TL, с ","TR, с "," $\epsilon_1$ , % "},LabelStyle->Directive[FontSize-
>14,FontFamily->"Times"],Mesh->20,PlotTheme->"Detailed",PlotLegends->Automatic]

```

Залежність умовна продуктивності сепаратора Q_N від факторів досліджень

```

M={{-1,-1,81},{-1,0,71.7857142857143},{-1,1,62.25},{0,-
1,82.8181818181818},{0,0,75.4166666666667},{0,1,70.5384615384615},{1,-
1,60.4375},{1,0,57.5294117647059},{1,1,54.0833333333333}};
nlm=NonlinearModelFit[M,a00+a10 *x1+a20 * x2+a12* x1*x2+a11* x1^2+a22
*x2^2,{a00,a10,a20,a12,a11,a22 },{x1,x2}];
"Закодоване повне"
Normal[nlm]
"Критерій Стюдента"
nlm["ParameterTable"]
QQ[x1_,x2_] :=76.0728932015697` -7.164244864612522` x1-
11.743443443811072` x1^2-6.230647824397836` x2+3.0989583333333304` x1 x2

```

```

"Розкадроване скорочене"
x10=20;
dx1=10;
x20=4;
dx2=2;
Q [TL _ ,TR _ ] := QQ [ (TL - x10) / dx1 , (TR - x20) / dx2 ] ;
Expand[ Q [TL ,TR ] ]
"Оптимум"
Opt=FindMaximum[{ Q [TL ,TR ],x10-dx1<=TL<=x10+dx1,x20-
dx2<=TR<=x20+dx2},{TL,x10-dx1},{TR,x20-dx2}]
TLopt=TL/.Last[Opt];
TRopt=TR/.Last[Opt];
"Графіки"
Plot3D[ Q [TL ,TR ],{TL,x10-dx1,x10+dx1},{TR,x20-dx2,x20+dx2},PlotStyle-
>{Yellow}, AxesLabel->{"TL, c ", "TR, c ", "QN, шт./c "},LabelStyle->Directive[FontSize-
>14,FontFamily->"Times"],Mesh->20,PlotTheme->"Detailed",PlotLegends->Automatic]

```

Компромiсна задача

```

QQ[x1_,x2_]:=76.0728932015697` -7.164244864612522` x1-
11.743443443811072` x12-6.230647824397836` x2+3.0989583333333304` x1 x2
EE[x1_,x2_]:=4.640211640211641` +1.2825396825396835`
x1+0.5349206349206365` x12-0.2444444444444444344` x2
x10=10;
dx1=10;
x20=4;
dx2=2;
QQ1 [TL _ ,TR _ ] := QQ [ (TL - x10) / dx1 , (TR - x20) / dx2 ] ;
EE1 [TL _ ,TR _ ] := EE [ (TL - x10) / dx1 , (TR - x20) / dx2 ] ;
"Оптимум"
Opt=FindMaximum[{( QQ1 [TL ,TR ] ^ 2 ) / EE1 [TL ,TR ],x10-
dx1<=TL<=x10+dx1,x20-dx2<=TR<=x20+dx2},{TL,x10-dx1},{TR,x20-dx2}]
TLopt=TL/.Last[Opt];
TRopt=TR/.Last[Opt];
QQ1 [TL opt ,TR opt ]
EE1 [TL opt ,TR opt ]

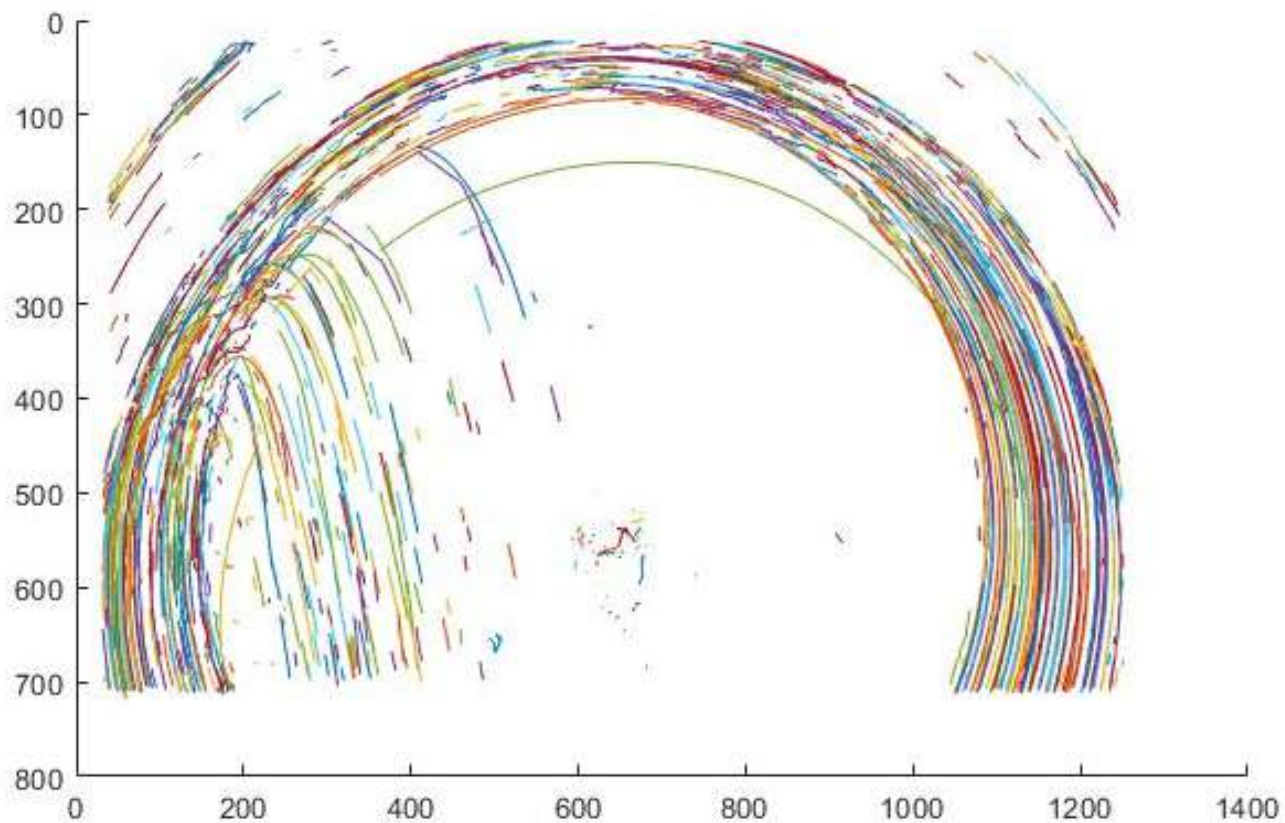
```

Додаток Д

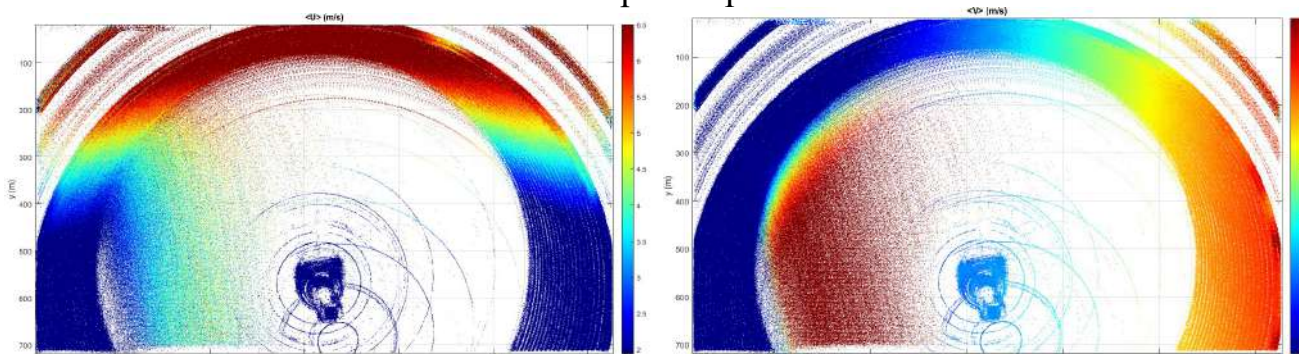
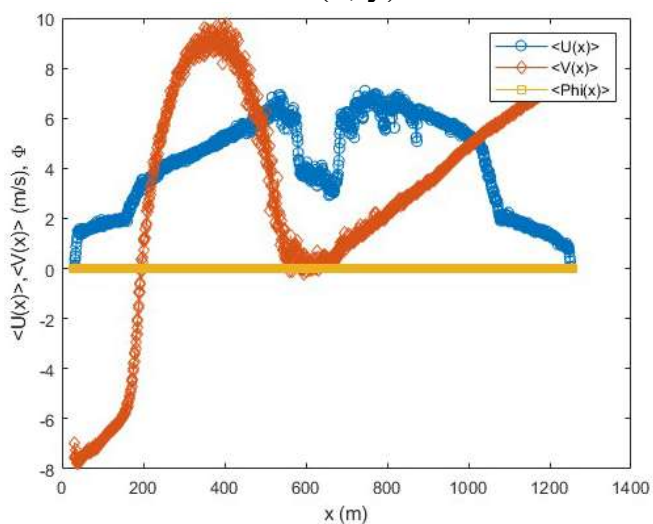
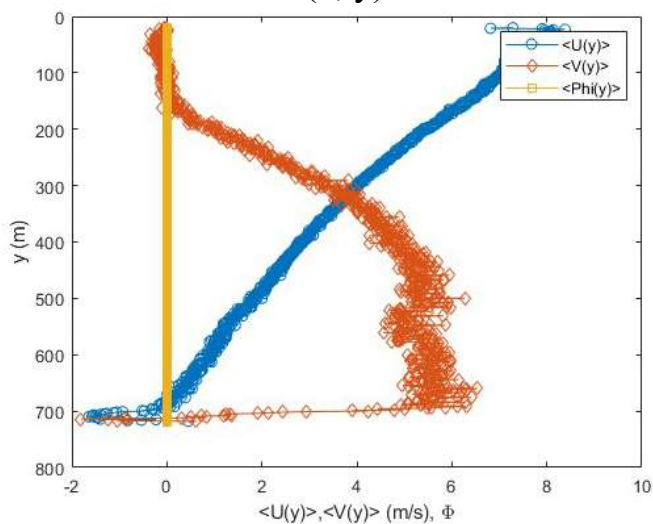
Результати експериментальних досліджень процесу сепарації дрібнонасінневих культур на селекційно-насінницькому трієрі

№	x ₆	x ₂	x ₇	M ₀ , кг	n, об/хв	f ₀ , %	θ _{min} , рад				θ _{max} , рад			
							Гірчиця	Рижій	Ріпак	Сер.	Гірчиця	Рижій	Ріпак	Сер.
1	-1	-1	-1	0,1	34	10	0,108	0,092	0,094	0,098	0,555	0,535	0,545	0,545
2	-1	-1	0	0,1	34	30	0,111	0,087	0,097	0,098	0,546	0,530	0,553	0,543
3	-1	-1	1	0,1	34	50	0,103	0,082	0,090	0,092	0,542	0,523	0,539	0,535
4	-1	0	-1	0,1	40	10	0,178	0,162	0,164	0,168	0,760	0,739	0,748	0,749
5	-1	0	0	0,1	40	30	0,171	0,156	0,166	0,164	0,751	0,738	0,746	0,745
6	-1	0	1	0,1	40	50	0,157	0,149	0,157	0,154	0,747	0,739	0,741	0,742
7	-1	1	-1	0,1	46	10	0,262	0,242	0,248	0,250	0,954	0,939	0,959	0,951
8	-1	1	0	0,1	46	30	0,252	0,230	0,239	0,240	0,955	0,932	0,944	0,944
9	-1	1	1	0,1	46	50	0,245	0,231	0,230	0,235	0,949	0,929	0,939	0,939
10	0	-1	-1	0,2	34	10	0,138	0,128	0,135	0,134	0,591	0,583	0,589	0,588
11	0	-1	0	0,2	34	30	0,130	0,115	0,138	0,128	0,588	0,572	0,565	0,575
12	0	-1	1	0,2	34	50	0,144	0,120	0,134	0,133	0,578	0,564	0,584	0,576
13	0	0	-1	0,2	40	10	0,250	0,234	0,236	0,240	0,797	0,776	0,784	0,786
14	0	0	0	0,2	40	30	0,234	0,217	0,239	0,230	0,792	0,776	0,773	0,781
15	0	0	1	0,2	40	50	0,247	0,228	0,231	0,235	0,782	0,765	0,782	0,777
16	0	1	-1	0,2	46	10	0,346	0,326	0,345	0,339	1,000	0,989	0,999	0,996
17	0	1	0	0,2	46	30	0,337	0,317	0,336	0,330	0,998	0,987	0,997	0,994
18	0	1	1	0,2	46	50	0,337	0,322	0,317	0,325	0,997	0,981	0,999	0,992
19	1	-1	-1	0,3	34	10	0,225	0,208	0,221	0,218	0,619	0,609	0,621	0,616
20	1	-1	0	0,3	34	30	0,211	0,197	0,217	0,208	0,615	0,609	0,612	0,612
21	1	-1	1	0,3	34	50	0,226	0,210	0,207	0,215	0,609	0,585	0,595	0,596
22	1	0	-1	0,3	40	10	0,340	0,322	0,342	0,335	0,836	0,828	0,836	0,833
23	1	0	0	0,3	40	30	0,328	0,319	0,328	0,325	0,836	0,820	0,813	0,823
24	1	0	1	0,3	40	50	0,323	0,307	0,330	0,320	0,829	0,822	0,823	0,825
25	1	1	-1	0,3	46	10	0,475	0,459	0,461	0,465	1,048	1,025	1,032	1,035
26	1	1	0	0,3	46	30	0,458	0,450	0,450	0,452	1,044	1,034	1,041	1,040
27	1	1	1	0,3	46	50	0,448	0,432	0,455	0,445	1,039	1,032	1,034	1,035

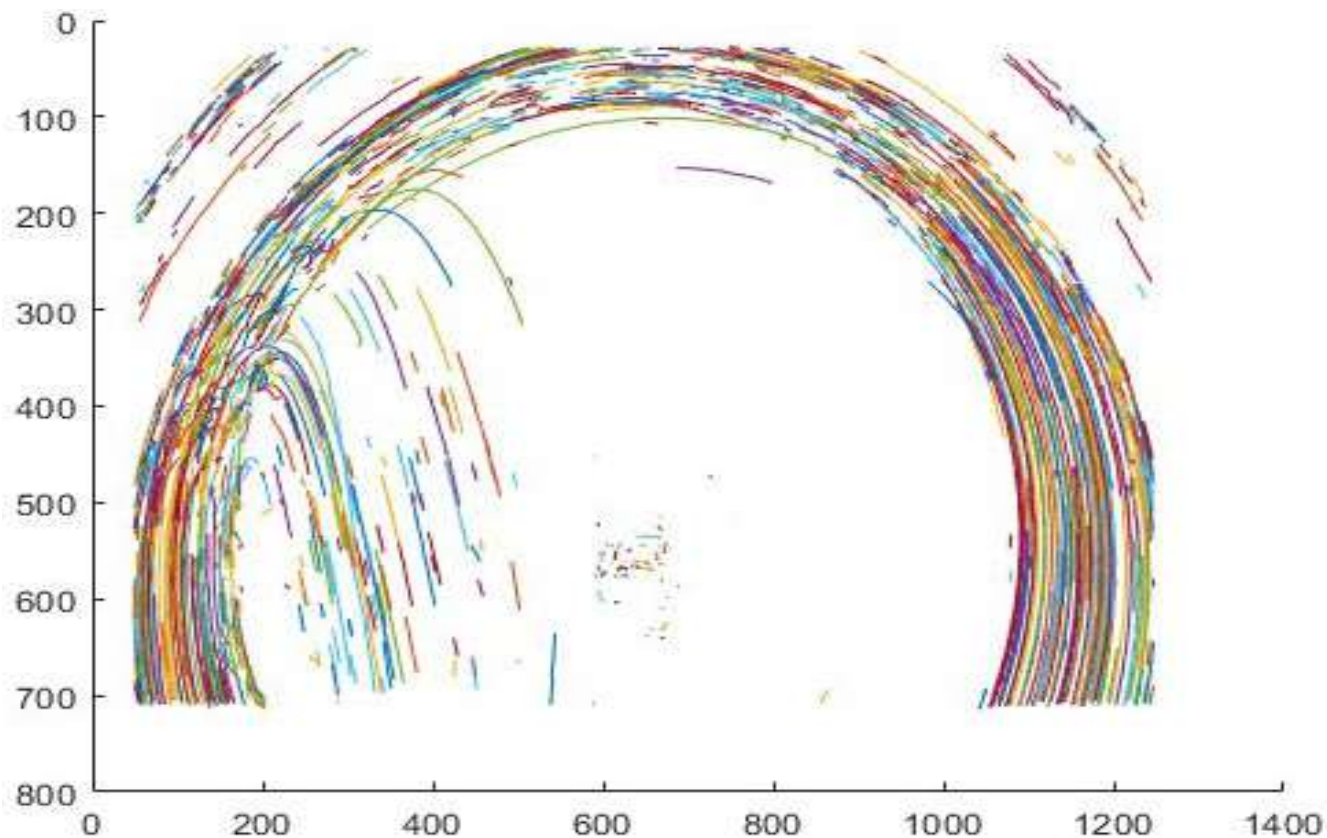
Гірчиця, № 1



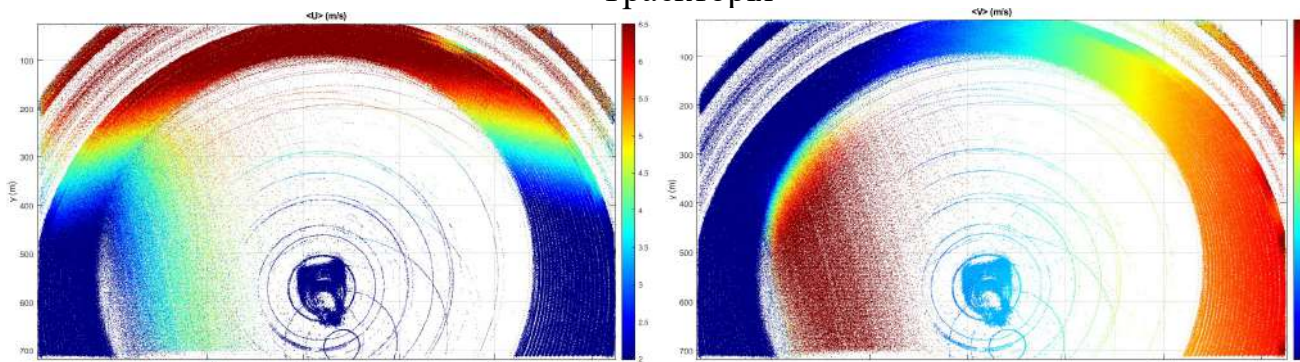
Траекторія

 $U(x, y)$ $V(x, y)$  $U(x), V(x), \Phi(x)$  $U(y), V(y), \Phi(y)$

Гірчиця, № 7

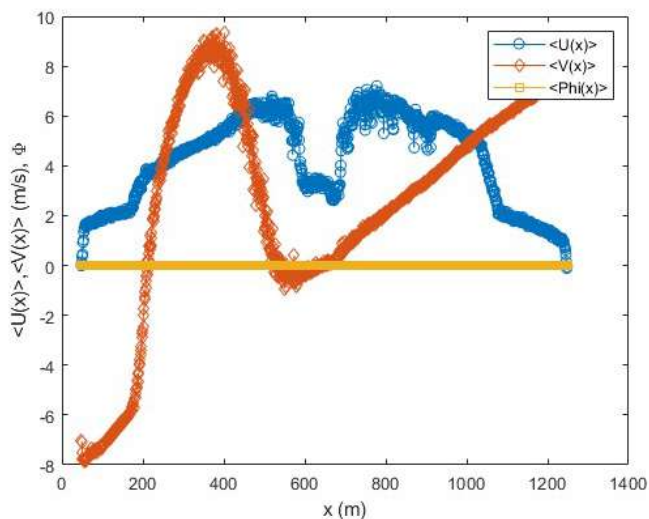


Траекторія

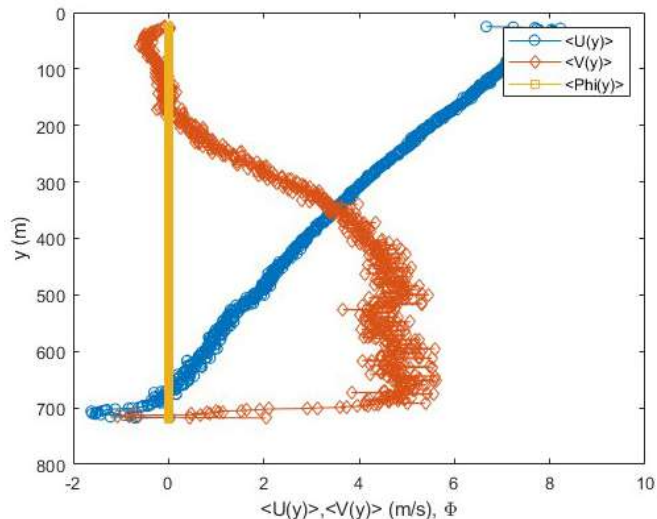


$U(x, y)$

$V(x, y)$

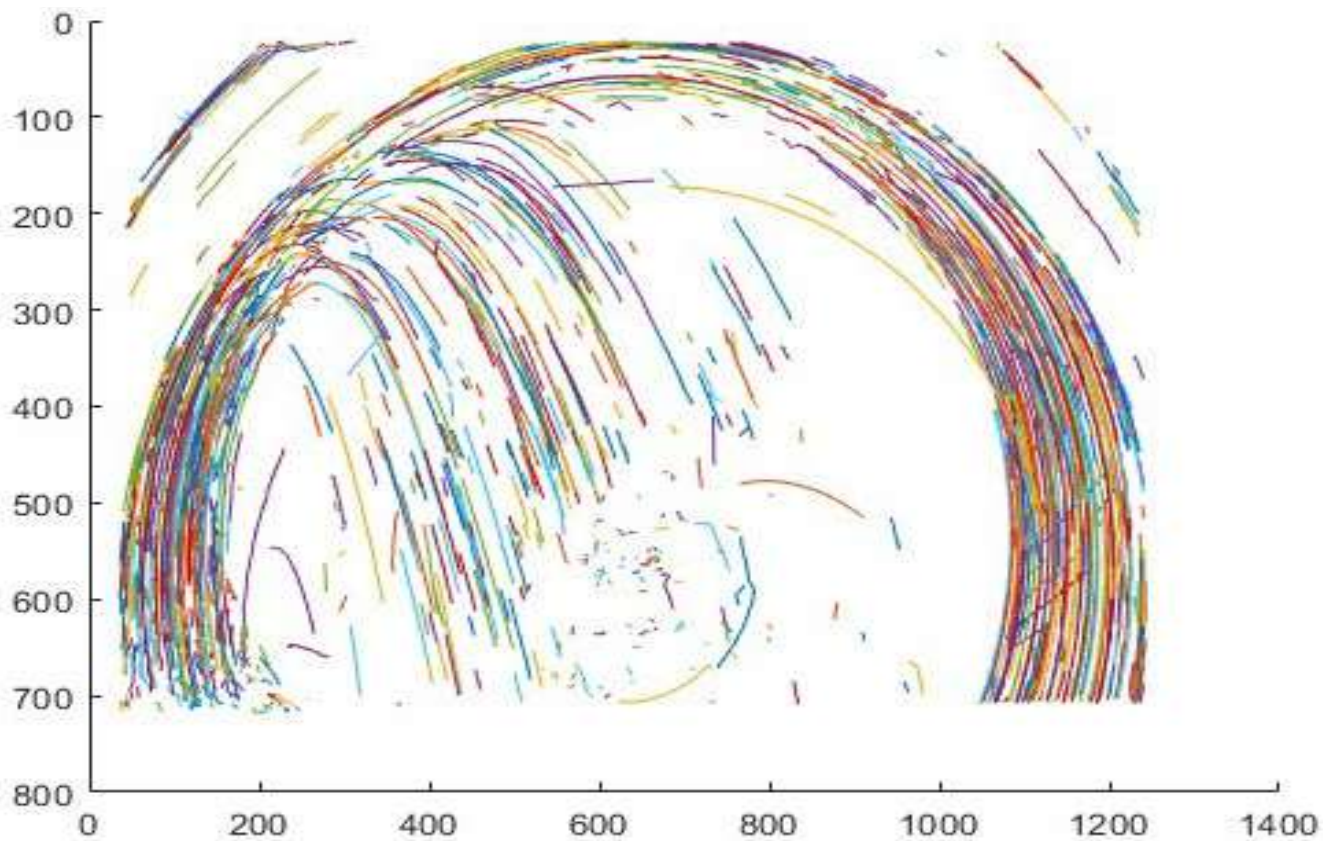


$U(x), V(x), \Phi(x)$

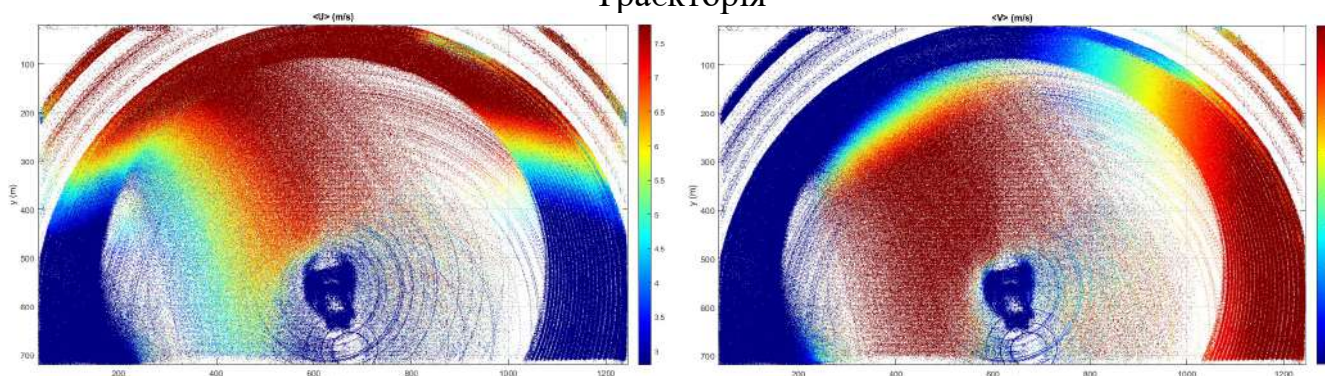
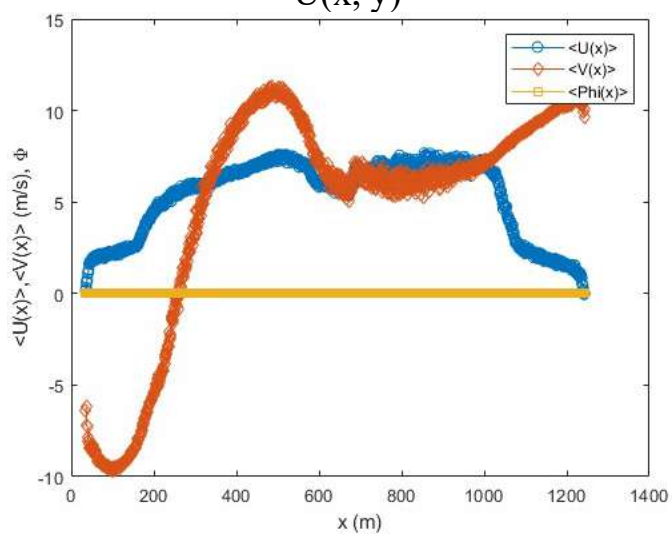
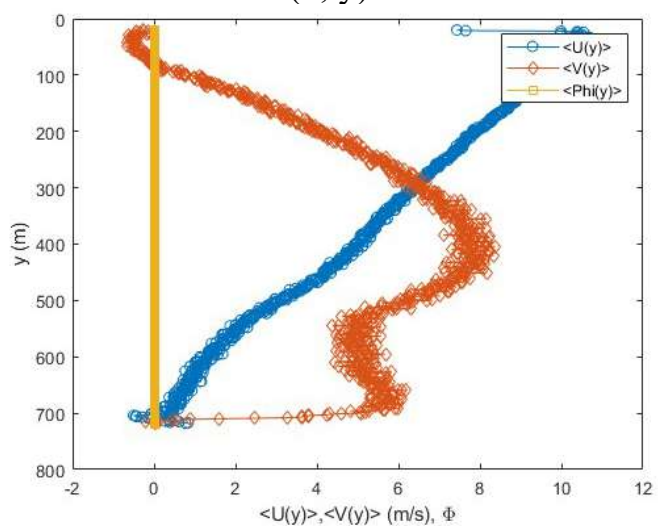


$U(y), V(y), \Phi(y)$

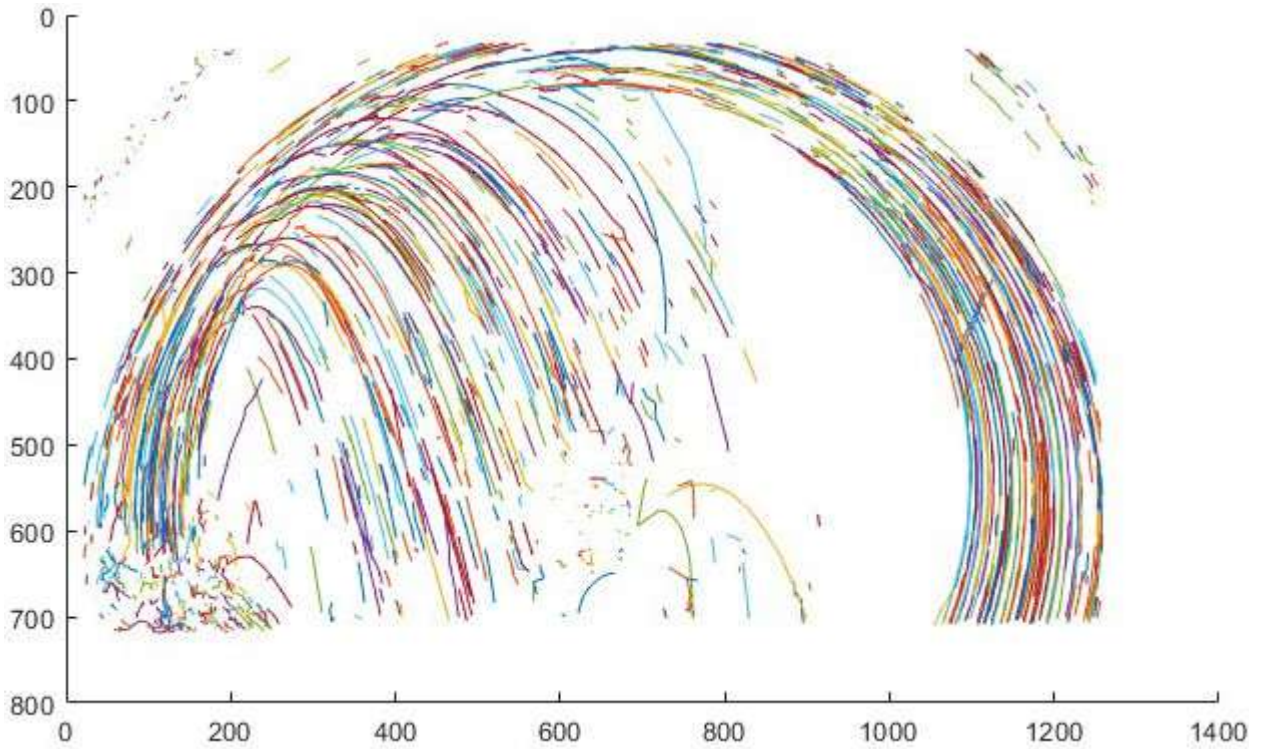
Гірчиця, № 15



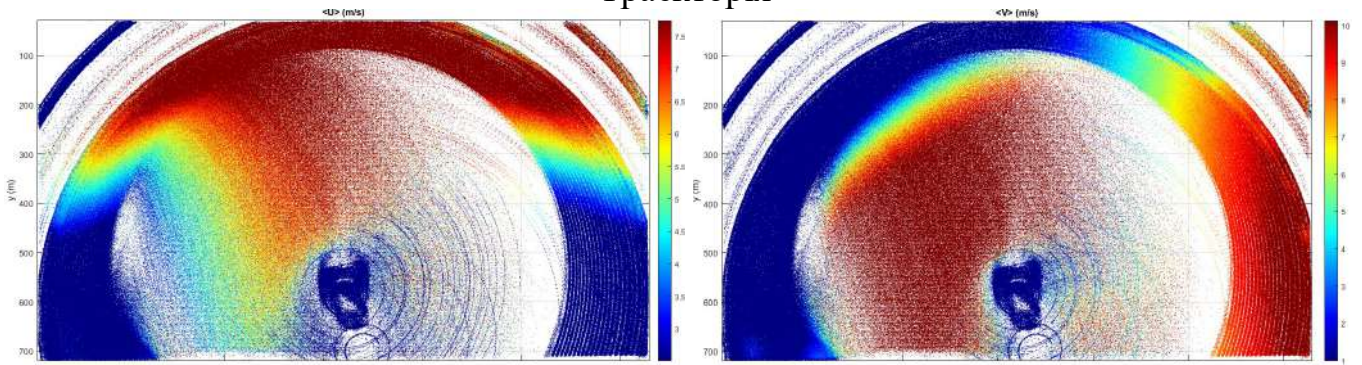
Траєкторія

 $U(x, y)$ $V(x, y)$  $U(x), V(x), \varphi(x)$  $U(y), V(y), \varphi(y)$

Гірчиця, № 27

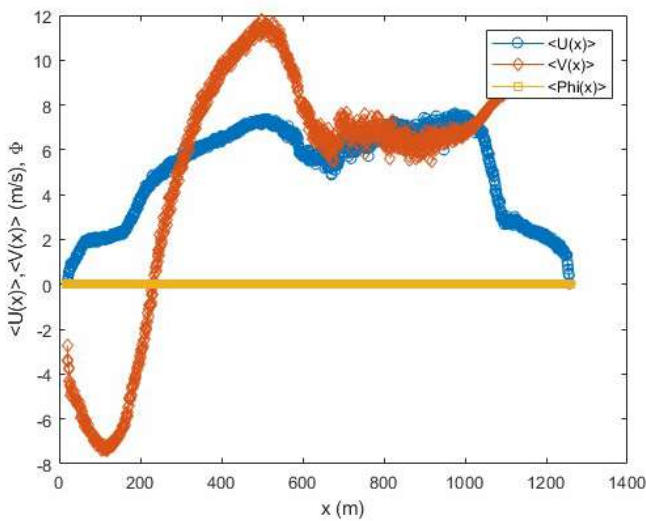


Траекторія

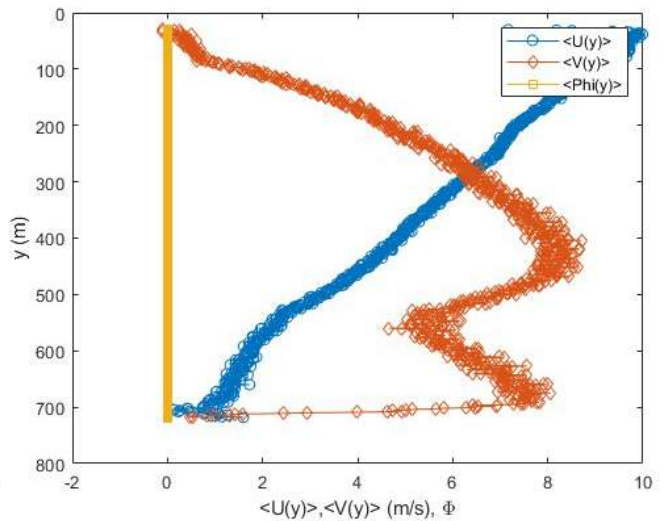


$U(x, y)$

$V(x, y)$

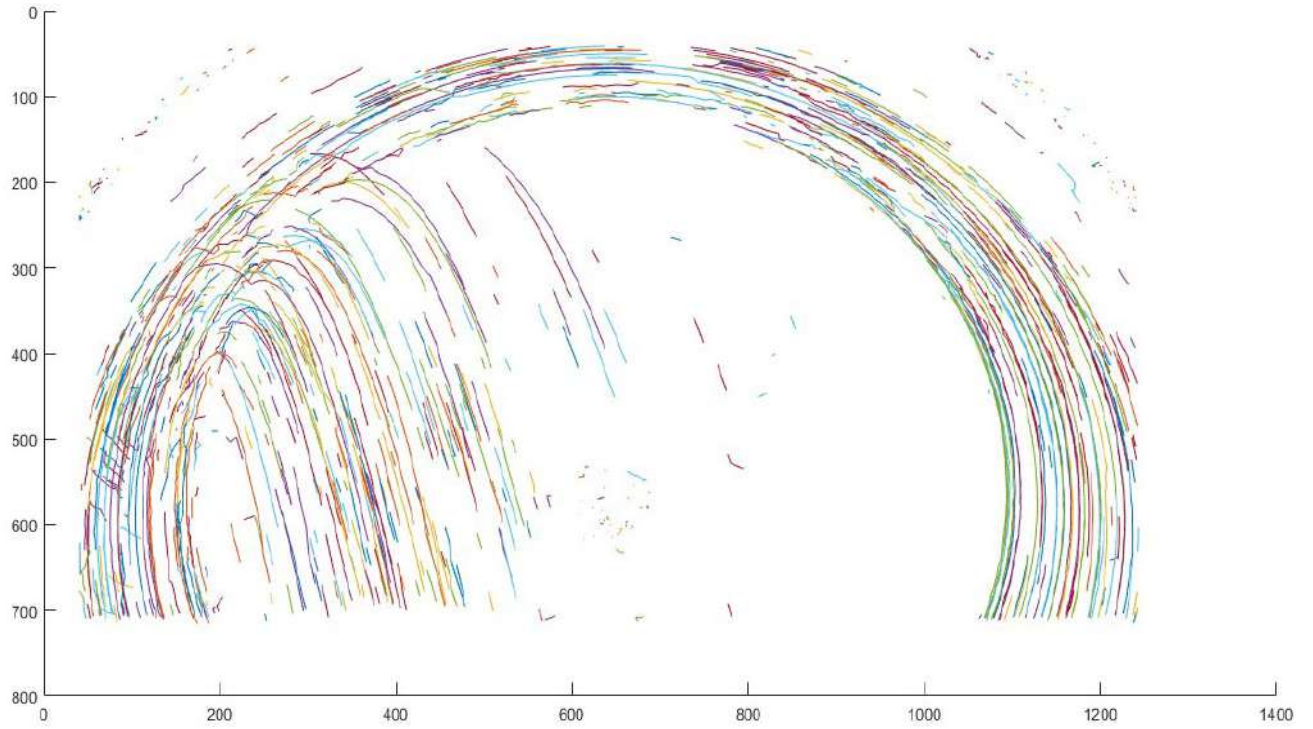


$U(x), V(x), \phi(x)$

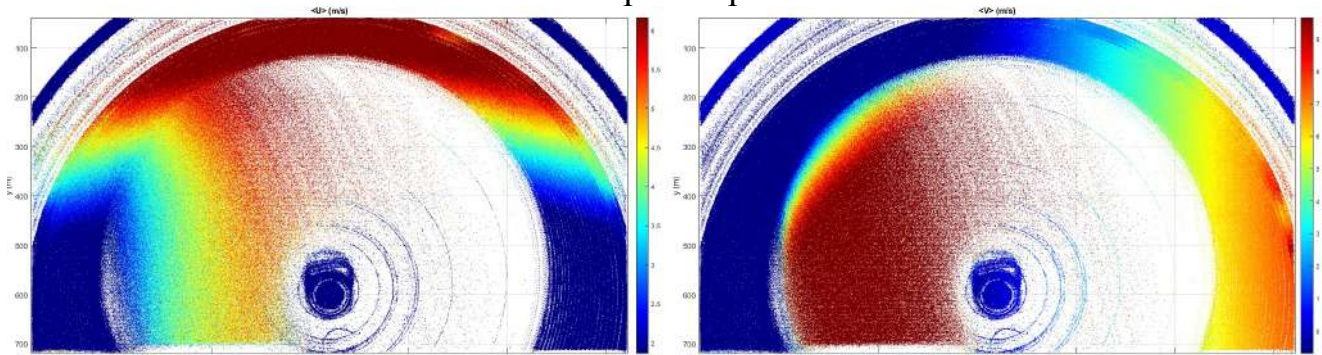


$U(y), V(y), \phi(y)$

Рижій, № 1

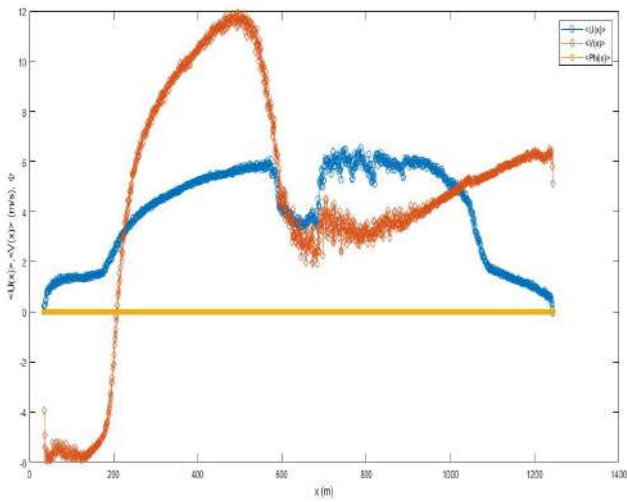


Траекторія

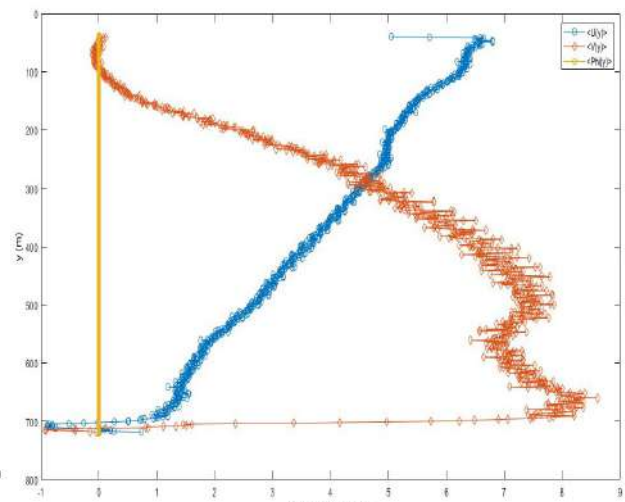


$U(x, y)$

$V(x, y)$

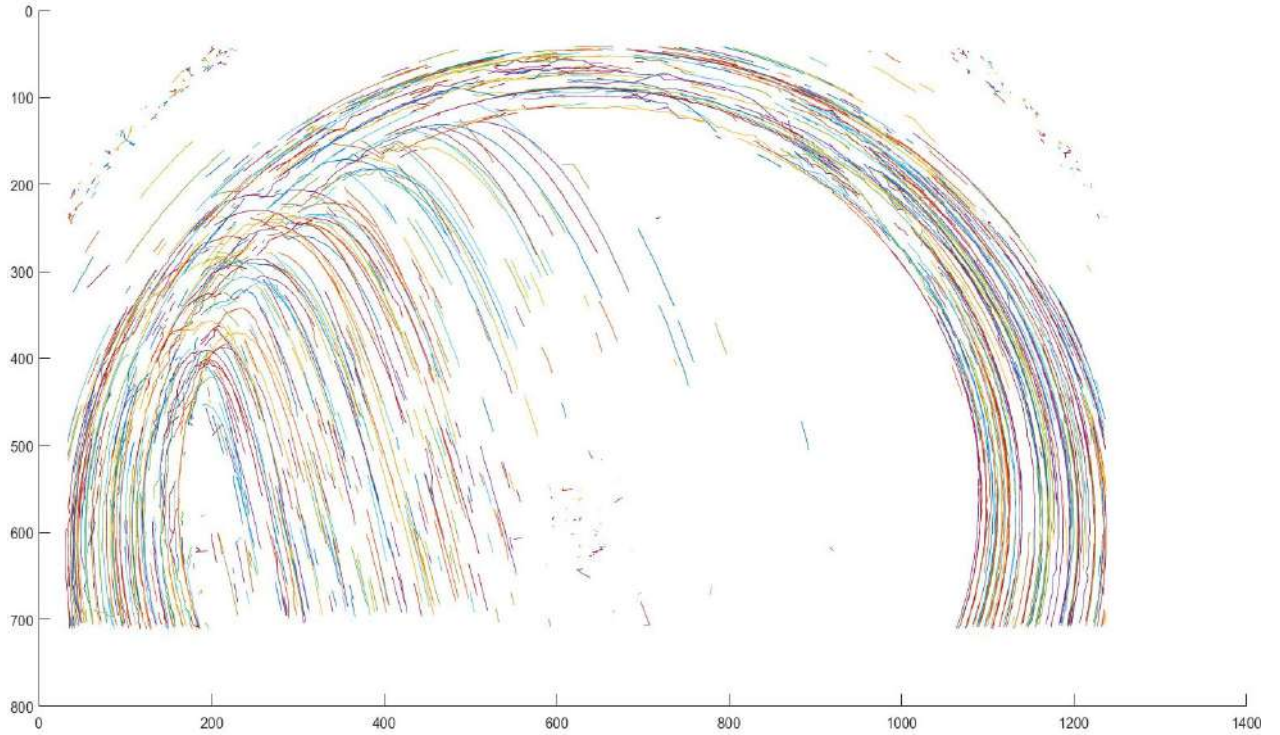


$U(x), V(x), \varphi(x)$

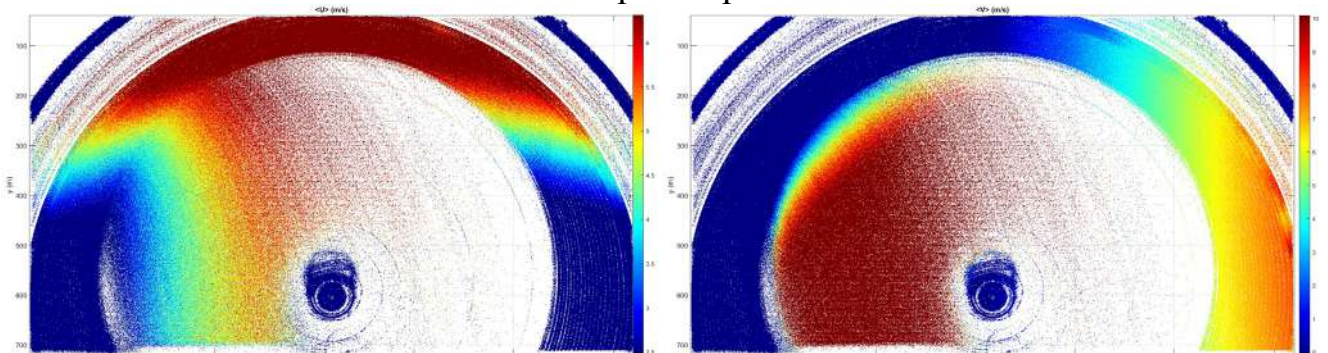


$U(y), V(y), \varphi(y)$

Рижій, № 7

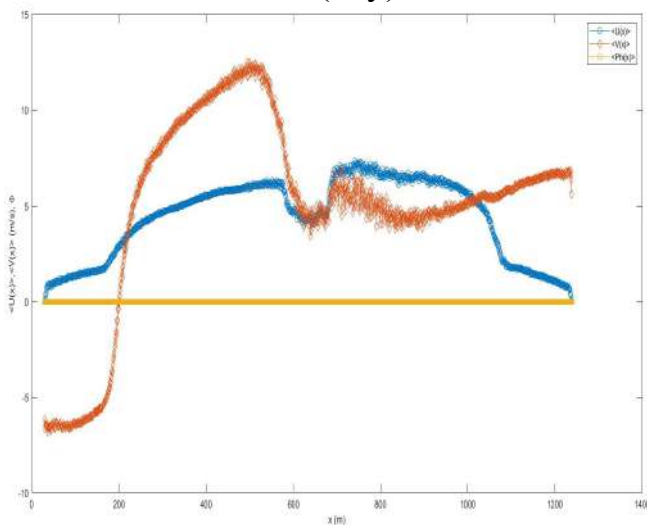


Траекторія

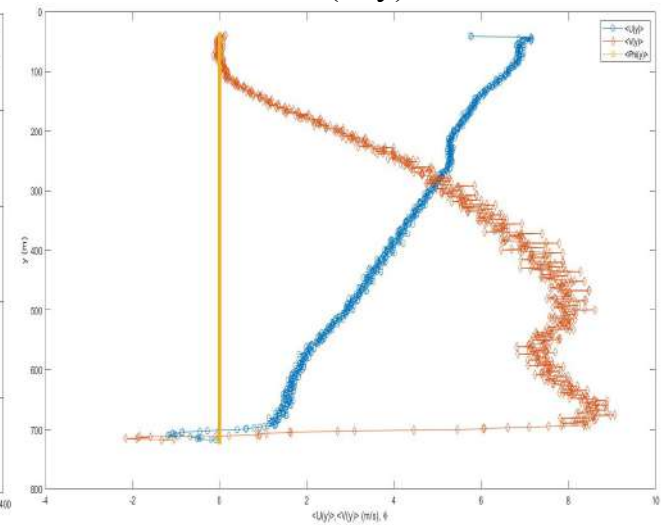


$U(x, y)$

$V(x, y)$

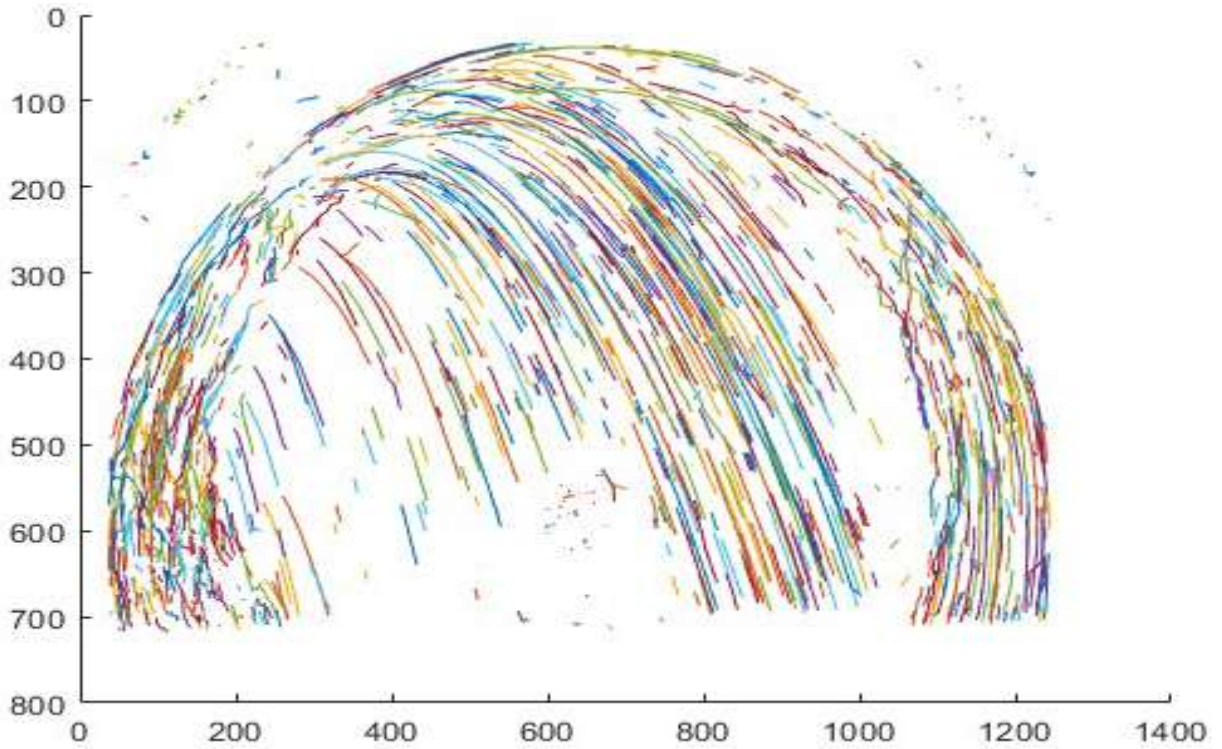


$U(x), V(x), \varphi(x)$

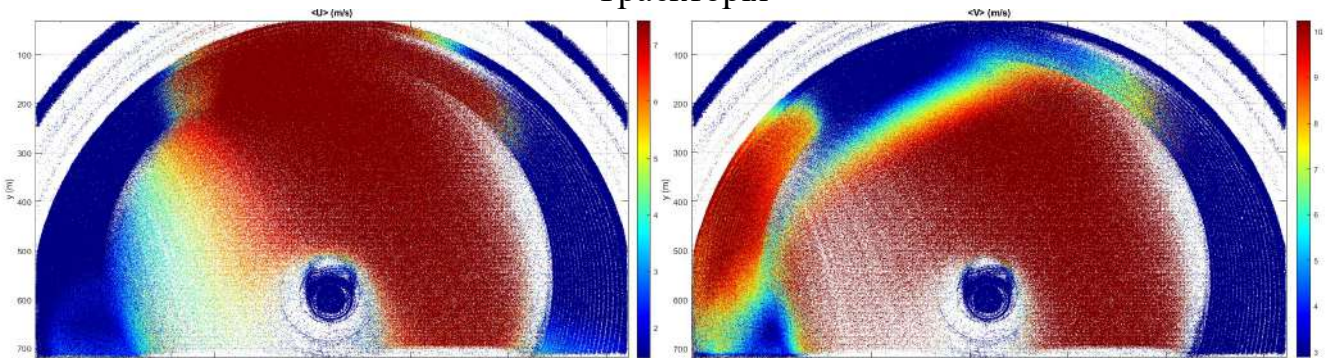


$U(y), V(y), \varphi(y)$

Рижій, № 15

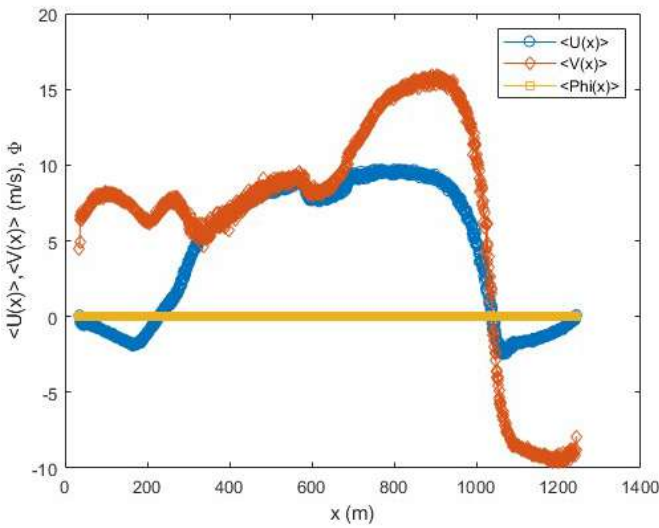


Траекторія

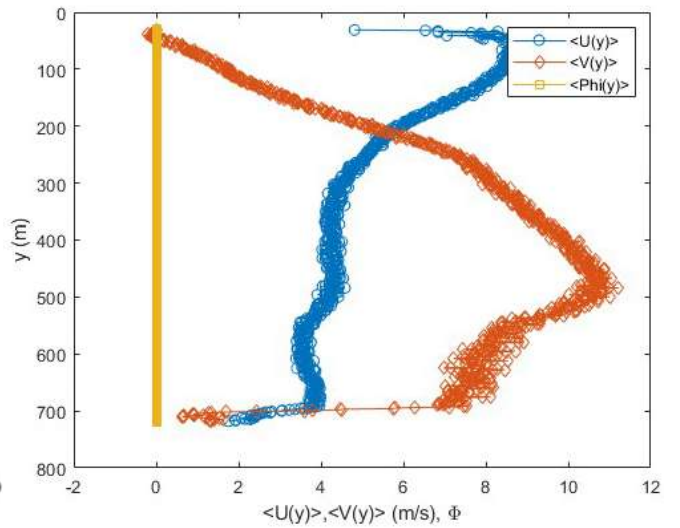


$U(x, y)$

$V(x, y)$

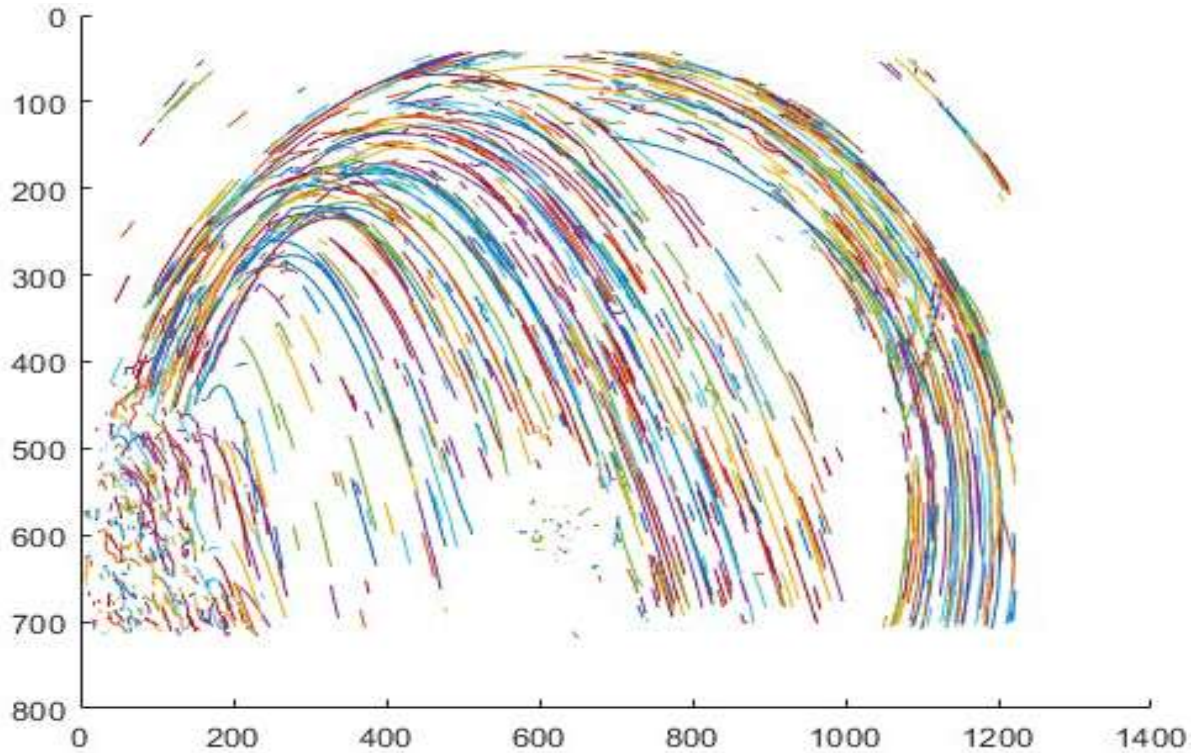


$U(x), V(x), \Phi(x)$

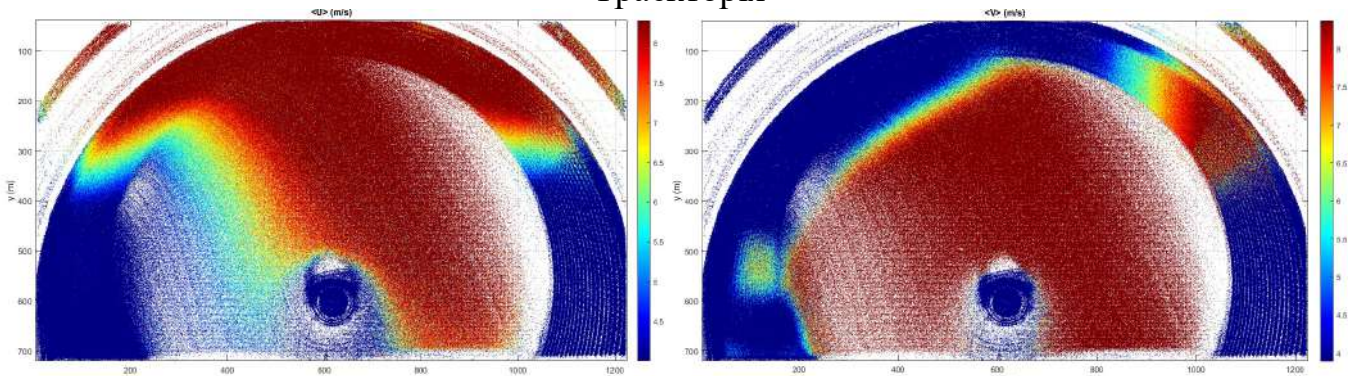


$U(y), V(y), \Phi(y)$

Рижій, № 27

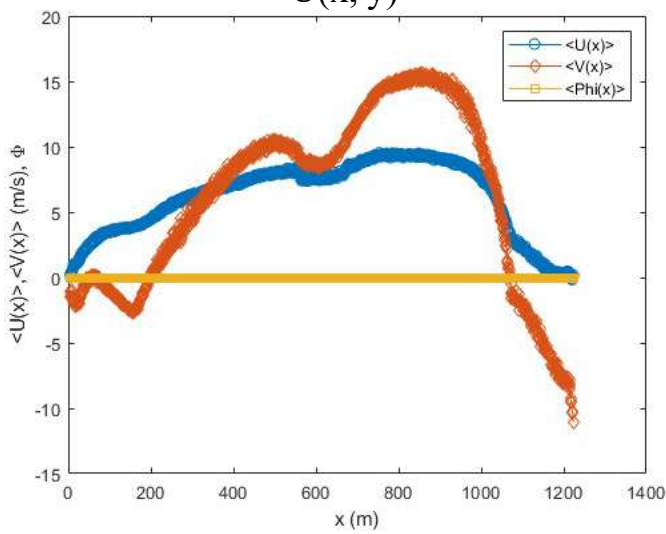


Траекторія

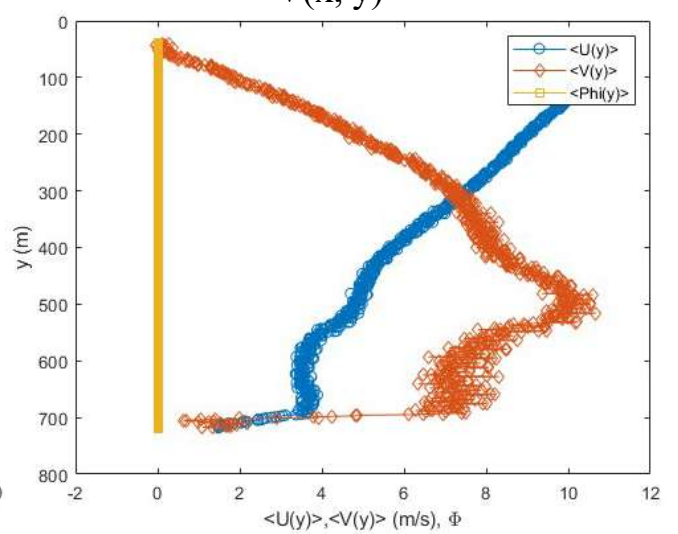


$U(x, y)$

$V(x, y)$

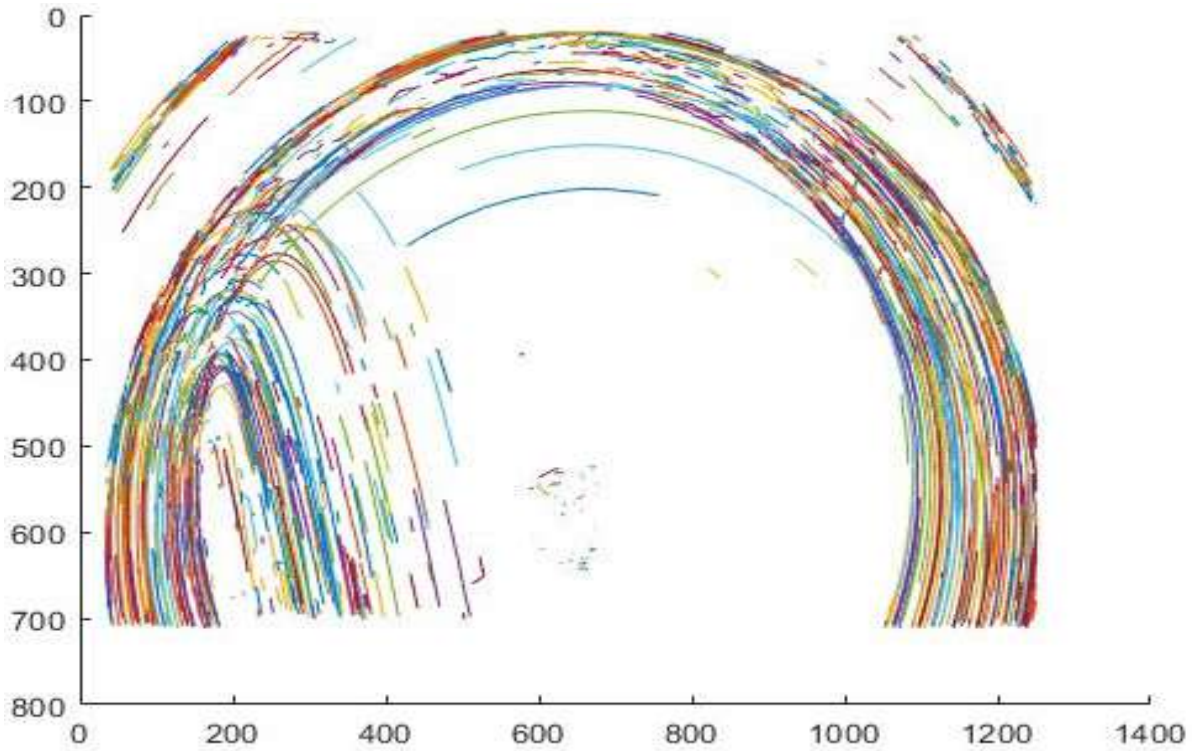


$U(x), V(x), \phi(x)$

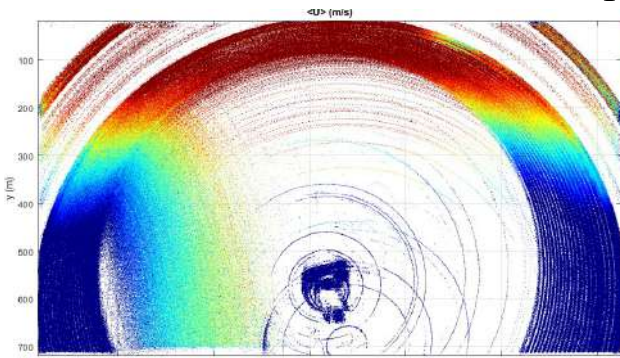


$U(y), V(y), \phi(y)$

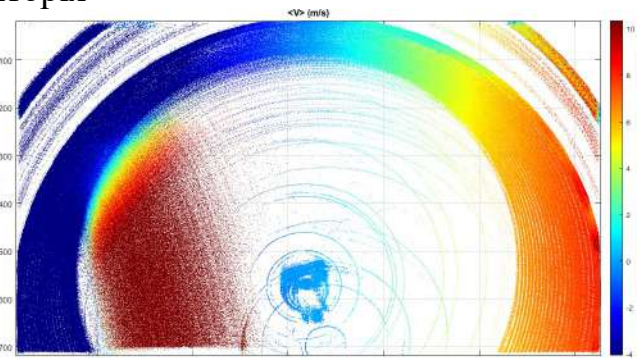
Ріпак, № 1



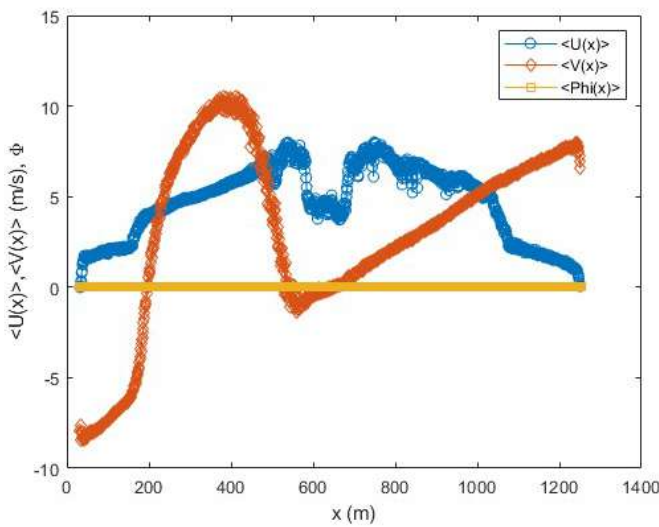
Траекторія



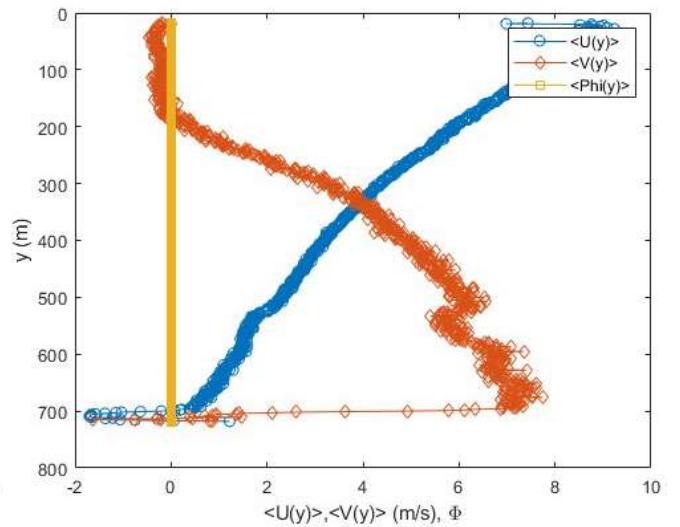
$U(x, y)$



$V(x, y)$

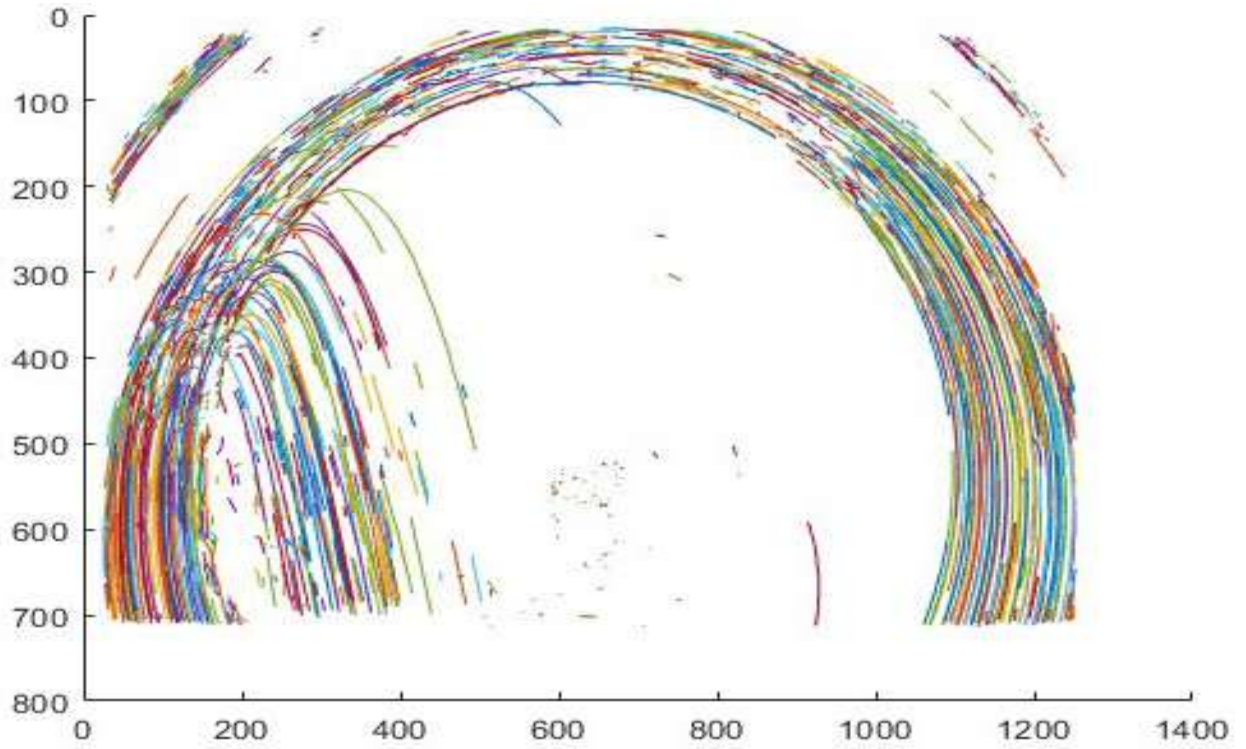


$U(x), V(x), \phi(x)$

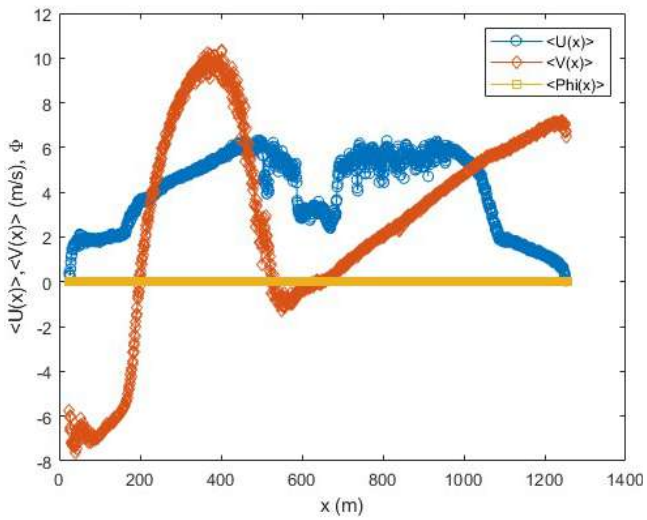
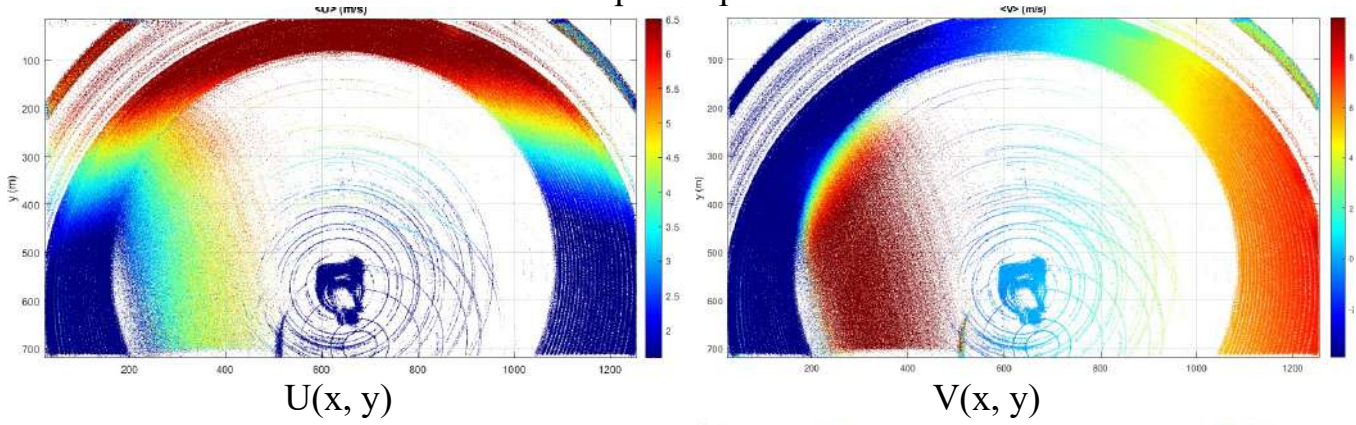


$U(y), V(y), \phi(y)$

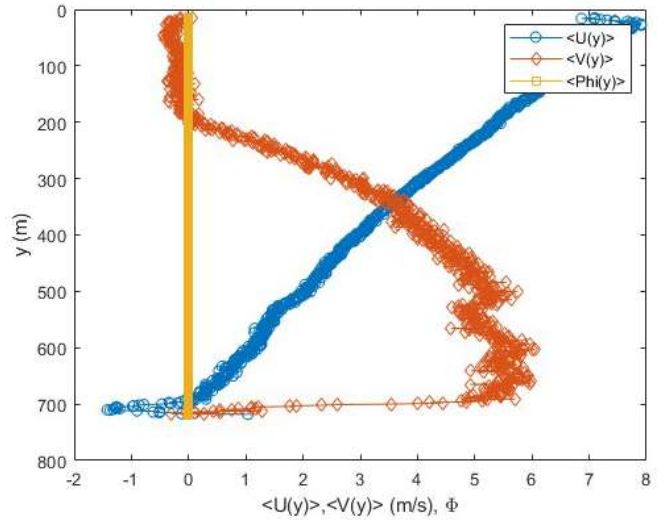
Ріпак, № 7



Траекторія

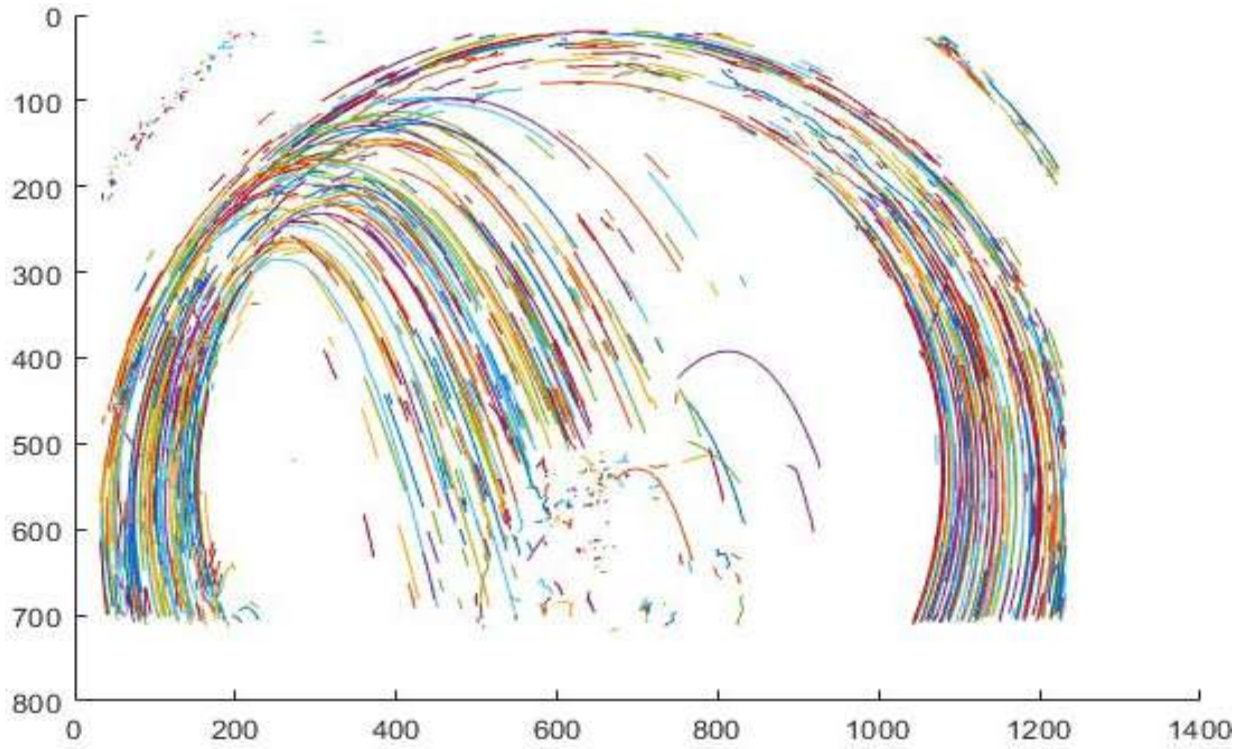


$U(x), V(x), \phi(x)$

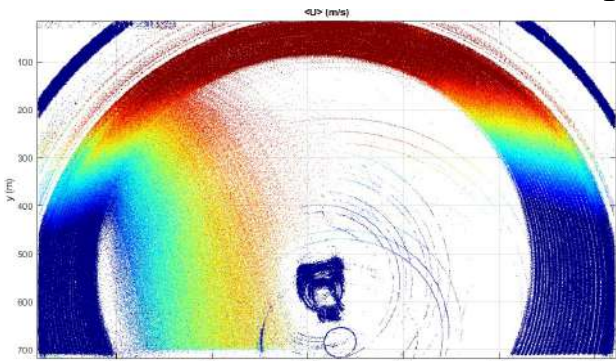


$U(y), V(y), \phi(y)$

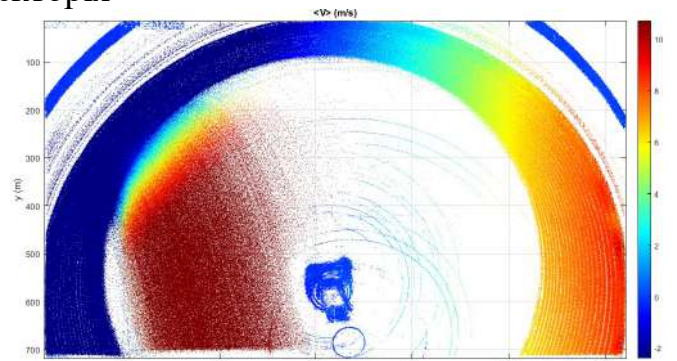
Ріпак, № 15



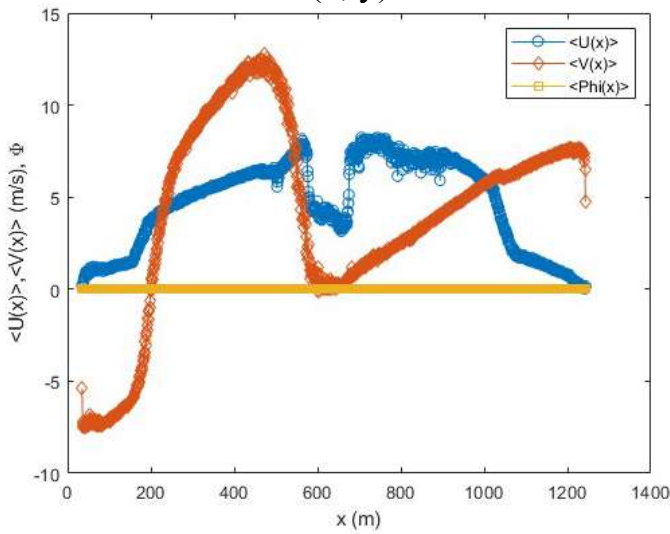
Траекторія



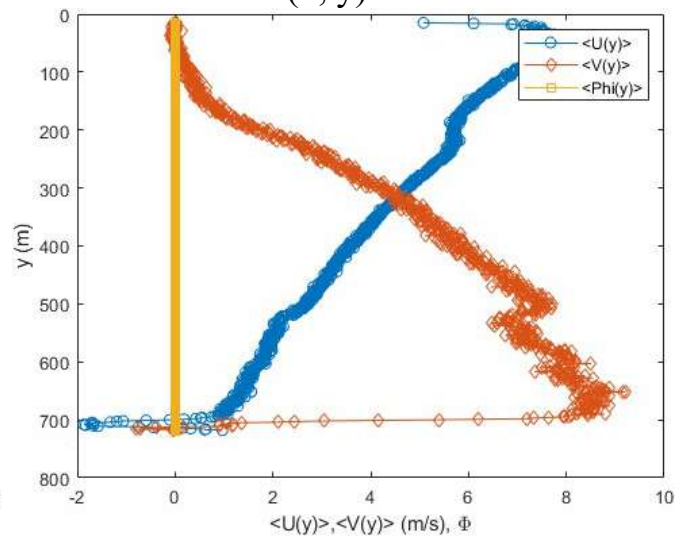
$U(x, y)$



$V(x, y)$

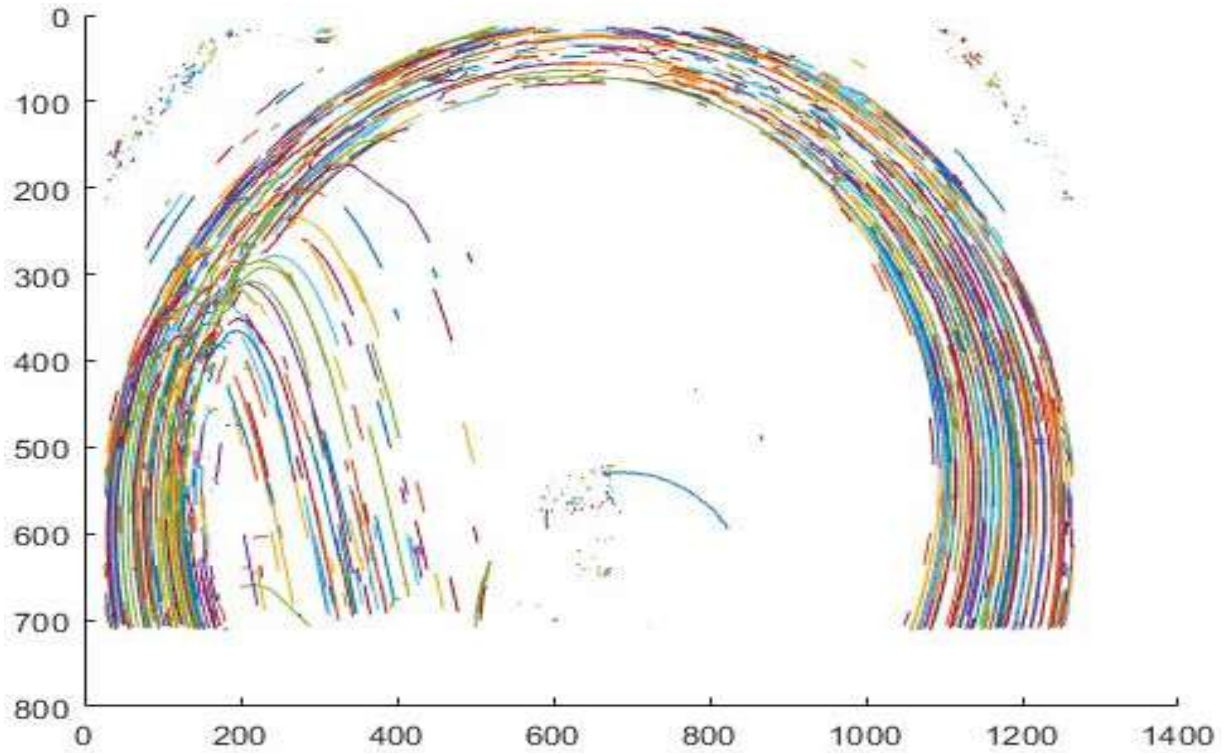


$U(x), V(x), \phi(x)$

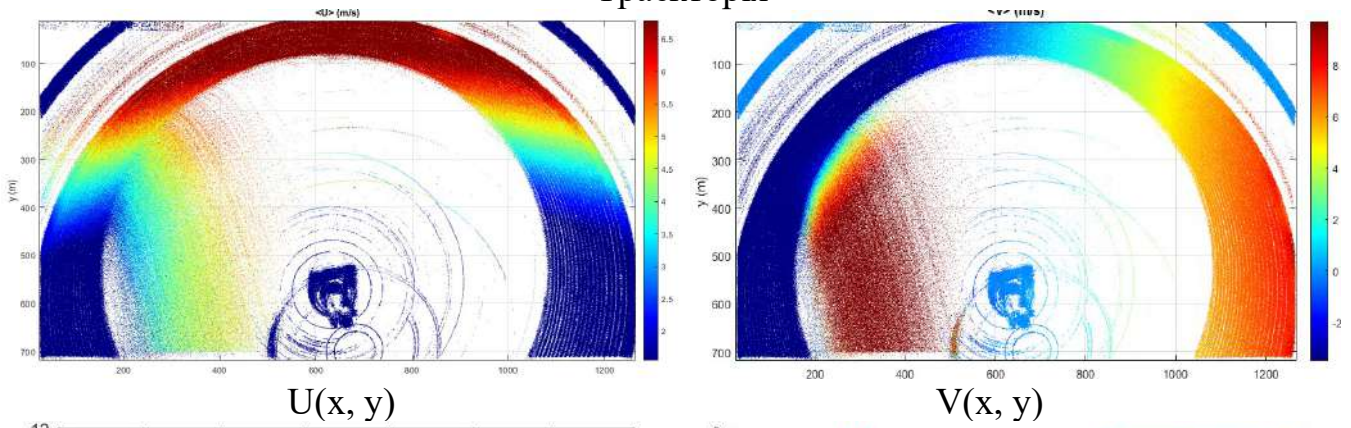


$U(y), V(y), \phi(y)$

Ріпак, № 27

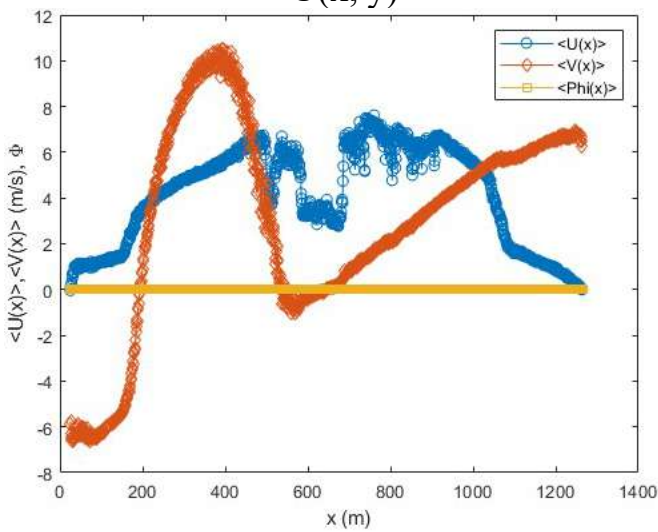


Траекторія

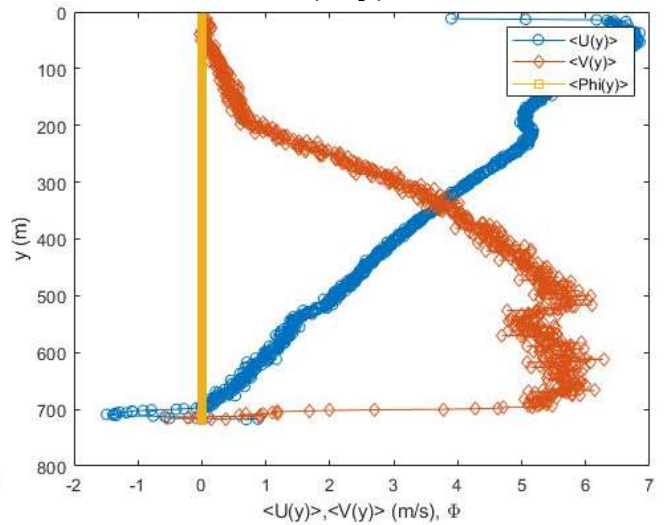


$U(x, y)$

$V(x, y)$



$U(x), V(x), \phi(x)$



$U(y), V(y), \phi(y)$

Додаток Е

Обробка даних експериментальних досліджень в програмному пакеті Wolfram Cloud

Залежність значень мінімального θ_{min} і максимального θ_{max} значень кутів виходу насіння з чарунки циліндра трієра від факторів досліджень

```

M1={{-1,-1,-1,0.0980023892},{-1,-1,0,0.0980023892},{-1,-1,1,0.0917523892},{-1,0,-1,0.1679902592},{-1,0,0,0.1642402592},{-1,0,1,0.1542402592},{-1,1,-1,0.2504781292},{-1,1,0,0.2404781292},{-1,1,1,0.2354781292},{0,-1,-1,0.1338005092},{0,-1,0,0.1275505092},{0,-1,1,0.1325505092},{0,0,-1,0.2401168092},{0,0,0,0.2301168092},{0,0,1,0.2351168092},{0,1,-1,0.3389331092},{0,1,0,0.3301831092},{0,1,1,0.3251831092},{1,-1,-1,0.2183285292},{1,-1,0,0.2083285292},{1,-1,1,0.2145785292},{1,0,-1,0.3347232592},{1,0,0,0.3247232592},{1,0,1,0.3197232592},{1,1,-1,0.4648679892},{1,1,0,0.4523679892},{1,1,1,0.4448679892}};
M2={{-1,-1,-1,0.544883956888889},{-1,-1,0,0.543217290222222},{-1,-1,1,0.534883956888889},{-1,0,-1,0.748945075111111},{-1,0,0,0.745056186222222},{-1,0,1,0.742278408444445},{-1,1,-1,0.950783971111111},{-1,1,0,0.943561748888889},{-1,1,1,0.938561748888889},{0,-1,-1,0.587772845777778},{0,-1,0,0.574995068},{0,-1,1,0.575550623555556},{0,0,-1,0.785611741777778},{0,0,0,0.780611741777778},{0,0,1,0.776722852888889},{0,1,-1,0.99567286},{0,1,0,0.994006193333334},{0,1,1,0.992339526666667},{1,-1,-1,0.616217290222222},{1,-1,0,0.612328401333333},{1,-1,1,0.596217290222222},{1,0,-1,0.833389519555556},{1,0,0,0.822833964},{1,0,1,0.824500630666667},{1,1,-1,1.035006193333333},{1,1,0,1.040006193333333},{1,1,1,1.035006193333333}};
nlm1=NonlinearModelFit[M1,a00+a10 *x1+a20 * x2+a30 *x3+a12* x1*x2+a13 *x1*x3+a23* x2*x3+a11* x1^2+a22 *x2^2+a33 *x3^2,{a00,a10,a20,a30,a12,a13,a23,a11,a22,a33 },{x1,x2,x3}];
"Закодоване повне"
Normal[nlm1]
"Критерій Стюдента"
nlm1["ParameterTable"]
nlm2=NonlinearModelFit[M2,a00+a10 *x1+a20 * x2+a30 *x3+a12* x1*x2+a13 *x1*x3+a23* x2*x3+a11* x1^2+a22 *x2^2+a33 *x3^2,{a00,a10,a20,a30,a12,a13,a23,a11,a22,a33 },{x1,x2,x3}];
"Закодоване повне"
Normal[nlm2]
"Критерій Стюдента"
nlm2["ParameterTable"]
"Закодоване скорочене"

```

```

QQ1[x1_,x2_,x3_] :=0.22845014253333332` +0.0823248333333334`
x1+0.016448283333333154` x1^2+0.09777463333333329` x2+0.02351592999999998` x1
x2+0.0035416666666666756` x2^2-0.005208333333333303` x3-0.003125000000000075`
x2 x3
QQ2[x1_,x2_,x3_] :=0.7850973384855973` +0.04018518518518471`
x1+0.2077154392098759` x2+0.006277777777776993` x1 x2-0.004567901234567733`
x3
"Розкадоване скорочене"
x10=0.2;
dx1=0.1;
x20=40;
dx2=6;
x30=30;
dx3=20;
Q1 [m_,n_,f_] := QQ1 [ (m - x10) / dx1 , (n - x20) / dx2 , (f - x30) / dx3 ] ;
Q2 [m_,n_,f_] := QQ2 [ (m - x10) / dx1 , (n - x20) / dx2 , (f - x30) / dx3 ] ;
Expand[ Q1 [m,n,f] ]
Expand[ Q2 [m,n,f] ]
"Оптимум"
Opt=FindMinimum[{ Q1 [m,n,f] ,x10-dx1<=m<=x10+dx1,x20-
dx2<=n<=x20+dx2,x30-dx3<=f<=x30+dx3},{m,x10-dx1},{n,x20-dx2},{f,x30-dx3}]
mopt=m/.Last[Opt];
nopt=n/.Last[Opt];
fopt=f/.Last[Opt];
"Графики"
Plot3D[{Legended[ Q1[ m , n , fopt],Placed["θmin(f0" == fopt
"%)",Bottom]],Legended[ Q2[ m , n , fopt],Placed["θmax(f0" == fopt
"%)",Bottom]]},{m,x10-dx1,x10+dx1},{n,x20-dx2,x20+dx2},PlotStyle->{Green,
Orange}, AxesLabel->{"M0, кг ", "n, об/хв. ", "θ, рад. "},LabelStyle->Directive[FontSize-
>14,FontFamily->"Times"],Mesh->20,PlotTheme->"Detailed",PlotLegends->Automatic]
Plot3D[{Legended[ Q1[m ,nopt ,f],Placed["θmin(n" == nopt
"об/хв.)",Bottom]],Legended[ Q2[m ,nopt ,f],Placed["θmax(n" == nopt
"об/хв.)",Bottom]]},{m,x10-dx1,x10+dx1},{f,x30-dx3,x30+dx3},PlotStyle->{Green,
Orange}, AxesLabel->{"M0, кг ", "f0, % ", "θ, рад. "},LabelStyle->Directive[FontSize-
>14,FontFamily->"Times"],Mesh->20,PlotTheme->"Detailed",PlotLegends->Automatic]
Plot3D[{Legended[ Q1[mopt ,n ,f],Placed["θmin(M0" == mopt
"кг)",Below]],Legended[ Q2[mopt ,n ,f],Placed["θmax(M0" == mopt
"кг)",Below]]},{n,x20-dx2,x20+dx2},{f,x30-dx3,x30+dx3},PlotStyle->{Green, Orange},
AxesLabel->{"n, об/хв. ", "f0, % ", "θ, рад. "},LabelStyle->Directive[FontSize-
>14,FontFamily->"Times"],Mesh->20,PlotTheme->"Detailed",PlotLegends->Automatic]

```

Додаток Ж

Програмне забезпечення системи керування Arduino UNO мехатронної системи селекційно-насінницького трієра

```
#include <Servo.h>
Servo servo;
#define MOTOR1_IN 2
#define MOTOR1_PWM 3
int servoPin=9;
long sIn=0;
long sMode=0;
long sAngle1=0;
long sAngle2=0;
long Analog0 = 0;
long analogreshim = 0;
long chastota = 0;
long chastota_rev = 0;
int irsensor = 11;
int sensorvalue;
int time1 = 0;
int time2 = 0;
int timedelta = 0;
float RPM = 0;
float RPMmax = 0;
const int buttonPin = 13;
const int buttonPin2 = 12;
int buttonState = 0;
int buttonState2 = 0;
long tt=0;
long t1=0;
long t2=0;
long t3=0;
long ts=0;
long mode_T=0;
long mode_Tr=0;
long mode_Tl=0;
long mode_n=0;

void setup() {
  pinMode(buttonPin, INPUT);
  pinMode(buttonPin2, INPUT);
  pinMode(MOTOR1_IN, OUTPUT);
  pinMode(MOTOR1_PWM, OUTPUT);
```

```

pinMode(irsensor,INPUT);
servo.attach(servoPin);
servo.write(45);
Serial.begin(115200);
Serial.setTimeout(100);
Serial.println("Servo is ready");
}

void loop() {
  Analog0 = analogRead(0);
  sensorvalue=digitalRead(irsensor);
  if (sensorvalue == 1) {
    time1 = millis();
  }
  if (sensorvalue == 0) {
    time2 = time1;
  }
  timedelta = time1-time2;
  if (timedelta != 0){
    RPM = 60000/timedelta;
  }
  if (RPMmax < RPM){
    RPMmax = RPM;
  }
  buttonState = digitalRead(buttonPin);
  buttonState2 = digitalRead(buttonPin2);
  if (buttonState == HIGH) {
    if (analogreshim == 1){
      motorControl(512, MOTOR1_IN, MOTOR1_PWM);
    }
    sIn=Serial.parseInt();
    if (sIn >= 1000000000){
      mode_n = (sIn-1000000000)/10000000;
      mode_T1 = (sIn-1000000000-10000000*mode_n)/100000;
      mode_Tr = (sIn-1000000000-10000000*mode_n-100000*mode_T1)/1000;
      mode_T = sIn-1000000000-10000000*mode_n-100000*mode_T1 - 1000*mode_Tr;
      Serial.println(sIn);
      Serial.println(mode_n);
      Serial.println(mode_T1);
      Serial.println(mode_Tr);
      Serial.println(mode_T);
      motorControl(200, MOTOR1_IN, MOTOR1_PWM);
      sAngle2 = 150;
      if(sAngle2<=sAngle1){

```

```

for(;sAngle2<=sAngle1;sAngle1--){
  servo.write(sAngle1);
  delay(20);
}
}else if(sAngle2>=sAngle1){
  for(;sAngle2>=sAngle1;sAngle1++){
    servo.write(sAngle1);
    delay(20);
  }
}
delay(1000);
t1 = millis();
chastota = mode_n*7642/1000+512;
sAngle2=40+(91440-90*chastota)/472;
if(sAngle2 >= 75){sAngle2 = 75;};
if(sAngle2<=sAngle1){
  for(;sAngle2<=sAngle1;sAngle1--){
    servo.write(sAngle1);
  }
}else if(sAngle2>=sAngle1){
  for(;sAngle2>=sAngle1;sAngle1++){
    servo.write(sAngle1);
  }
}
if (chastota > 1024) {chastota = 1024;}
while(t2 < mode_T*1000 + t1){
  t2 = millis();
  chastota_rev = mode_n*7642/1000+512;
  if (chastota_rev > 1024) {chastota_rev = 1024;}
  motorControl(chastota_rev, MOTOR1_IN, MOTOR1_PWM);
  delay(mode_T1*1000);
  chastota_rev = 512-mode_n*7648/1000;
  if (chastota_rev < 0) {chastota_rev = 0;}
  motorControl(chastota_rev, MOTOR1_IN, MOTOR1_PWM);
  delay(mode_Tr*1000);
}
motorControl(512, MOTOR1_IN, MOTOR1_PWM);
sAngle2 = 45;
if(sAngle2<=sAngle1){
  for(;sAngle2<=sAngle1;sAngle1--){
    servo.write(sAngle1);
  }
}
}else if(sAngle2>=sAngle1){
  for(;sAngle2>=sAngle1;sAngle1++){
    servo.write(sAngle1);
  }
}
}

```

```

    }
  }
}
sMode=sIn/1000;
switch (sMode) {
  case 1:
    sAngle2=sIn-1000;
    if(sAngle2<=sAngle1){
      for(;sAngle2<=sAngle1;sAngle1--){
        servo.write(sAngle1);
      }
    }else if(sAngle2>=sAngle1){
      for(;sAngle2>=sAngle1;sAngle1++){
        servo.write(sAngle1);
      }
    }
    break;
  case 2:
    chastota = (sIn-1000*sMode)*7642/1000+512;
    if (chastota > 1024) {chastota = 1024;}
    motorControl(chastota, MOTOR1_IN, MOTOR1_PWM);
    analogreshim = 0;
    break;
  case 3:
    chastota = 512-(sIn-1000*sMode)*7648/1000;
    if (chastota < 0) {chastota = 0;}
    motorControl(chastota, MOTOR1_IN, MOTOR1_PWM);
    analogreshim = 0;
    break;
  case 9:
    analogreshim = 1;
    break;
  default:
    break;
}
if (analogreshim==1){
  motorControl(Analog0, MOTOR1_IN, MOTOR1_PWM);
}
}
else {
  motorControl(Analog0, MOTOR1_IN, MOTOR1_PWM);
  analogreshim = 1;
  if (buttonState2 == LOW) {
    sAngle2=130;
  }else{

```

```
sAngle2=40+(91440-90*Analog0)/472;
if(sAngle2 >= 75){sAngle2 = 75;};
}
if(sAngle2<=sAngle1){
  for(;sAngle2<=sAngle1;sAngle1--){
    servo.write(sAngle1);
  }
}else if(sAngle2>=sAngle1){
  for(;sAngle2>=sAngle1;sAngle1++){
    servo.write(sAngle1);
  }
}
}
}

void motorControl(int val, byte pinIN, byte pinPWM) {
  val = map(val, 0, 1023, -255, 255);
  if (val > 0) { // вперед
    analogWrite(pinPWM, val);
    digitalWrite(pinIN, 0);
  } else if (val < 0) { // назад
    analogWrite(pinPWM, 255 + val);
    digitalWrite(pinIN, 1);
  } else { // стоп
    digitalWrite(pinIN, 0);
    digitalWrite(pinPWM, 0);
  }
}
}
```

Додаток И

Результати експериментальних досліджень процесу сепарації дрібнонасінневих культур на селекційно-насінницькому трієрі

№	x ₂	x ₄	x ₅	x ₈	n, об/хв	T _L , с	T _R , с	T,с	Маса,г					Вміст, %				Вміст ε, %	
									Лоток		Циліндр		Всього	Лоток		Циліндр			Лоток
									i	g	i	g		i	g	i	g		
1	-1	-1	-1	-1	34	10	2	60	1,7	91,8	88,3	118,2	300,0	1,8	98,2	42,8	57,2	31,2	
2	-1	-1	-1	0	34	10	2	120	2,9	178,6	87,1	31,4	300,0	1,6	98,4	73,5	26,5	60,5	
3	-1	-1	-1	1	34	10	2	180	3,6	199,9	86,4	10,1	300,0	1,8	98,2	89,5	10,5	67,8	
4	-1	-1	0	-1	34	10	4	60	1,6	112,4	88,4	97,6	300,0	1,4	98,6	47,5	52,5	38,0	
5	-1	-1	0	0	34	10	4	120	2,6	170,9	87,4	39,1	300,0	1,5	98,5	69,1	30,9	57,8	
6	-1	-1	0	1	34	10	4	180	3,4	199,6	86,6	10,4	300,0	1,7	98,3	89,3	10,7	67,7	
7	-1	-1	1	-1	34	10	6	60	1,1	106,4	88,9	103,6	300,0	1,1	98,9	46,2	53,8	35,8	
8	-1	-1	1	0	34	10	6	120	2,0	159,0	88,0	51,0	300,0	1,2	98,8	63,3	36,7	53,7	
9	-1	-1	1	1	34	10	6	180	4,2	199,3	85,8	10,7	300,0	2,1	97,9	88,9	11,1	67,8	
10	-1	0	-1	-1	34	20	2	60	3,3	151,2	86,7	58,8	300,0	2,2	97,8	59,6	40,4	51,5	
11	-1	0	-1	0	34	20	2	120	5,4	187,6	84,6	22,4	300,0	2,8	97,2	79,1	20,9	64,3	
12	-1	0	-1	1	34	20	2	180	6,0	193,5	84,0	16,5	300,0	3,0	97,0	83,6	16,4	66,5	
13	-1	0	0	-1	34	20	4	60	1,7	102,8	88,3	107,2	300,0	1,6	98,4	45,2	54,8	34,8	
14	-1	0	0	0	34	20	4	120	3,5	166,5	86,5	43,5	300,0	2,0	98,0	66,6	33,4	56,7	
15	-1	0	0	1	34	20	4	180	3,9	186,3	86,1	23,7	300,0	2,1	97,9	78,4	21,6	63,4	
16	-1	0	1	-1	34	20	6	60	2,3	122,5	87,7	87,5	300,0	1,8	98,2	50,1	49,9	41,6	
17	-1	0	1	0	34	20	6	120	3,1	132,4	86,9	77,6	300,0	2,3	97,7	52,8	47,2	45,2	
18	-1	0	1	1	34	20	6	180	4,3	158,6	85,7	51,4	300,0	2,6	97,4	62,5	37,5	54,3	
19	-1	1	-1	-1	34	30	2	60	3,5	110,7	86,5	99,3	300,0	3,1	96,9	46,6	53,4	38,1	
20	-1	1	-1	0	34	30	2	120	4,1	121,0	85,9	89,0	300,0	3,3	96,7	49,1	50,9	41,7	
21	-1	1	-1	1	34	30	2	180	3,8	122,9	86,2	87,1	300,0	3,0	97,0	49,7	50,3	42,2	
22	-1	1	0	-1	34	30	4	60	1,9	51,2	88,1	158,8	300,0	3,5	96,5	35,7	64,3	17,7	
23	-1	1	0	0	34	30	4	120	2,7	87,0	87,3	123,0	300,0	3,0	97,0	41,5	58,5	29,9	
24	-1	1	0	1	34	30	4	180	4,1	122,0	85,9	88,0	300,0	3,2	96,8	49,4	50,6	42,0	
25	-1	1	1	-1	34	30	6	60	1,9	64,1	88,1	145,9	300,0	2,8	97,2	37,7	62,3	22,0	
26	-1	1	1	0	34	30	6	120	2,6	104,3	87,4	105,7	300,0	2,5	97,5	45,2	54,8	35,6	
27	-1	1	1	1	34	30	6	180	3,1	119,9	86,9	90,1	300,0	2,5	97,5	49,1	50,9	41,0	
28	0	-1	-1	-1	40	10	2	60	1,3	77,9	88,7	132,1	300,0	1,7	98,3	40,2	59,8	26,4	
29	0	-1	-1	0	40	10	2	120	6,2	202,4	83,8	7,6	300,0	3,0	97,0	91,7	8,3	69,5	
30	0	-1	-1	1	40	10	2	180	9,0	202,5	81,0	7,5	300,0	4,3	95,7	91,5	8,5	70,5	
31	0	-1	0	-1	40	10	4	60	3,1	174,8	86,9	35,2	300,0	1,7	98,3	71,2	28,8	59,3	
32	0	-1	0	0	40	10	4	120	4,0	202,7	86,0	7,3	300,0	1,9	98,1	92,2	7,8	68,9	
33	0	-1	0	1	40	10	4	180	6,9	203,6	83,1	6,4	300,0	3,3	96,7	92,8	7,2	70,2	
34	0	-1	1	-1	40	10	6	60	1,4	148,1	88,6	61,9	300,0	0,9	99,1	58,9	41,1	49,8	
35	0	-1	1	0	40	10	6	120	4,2	202,8	85,8	7,2	300,0	2,0	98,0	92,2	7,8	69,0	
36	0	-1	1	1	40	10	6	180	7,9	203,8	82,1	6,2	300,0	3,7	96,3	93,0	7,0	70,6	
37	0	0	-1	-1	40	20	2	60	2,3	129,5	87,7	80,5	300,0	1,7	98,3	52,1	47,9	43,9	
38	0	0	-1	0	40	20	2	120	8,9	202,1	81,1	7,9	300,0	4,2	95,8	91,1	8,9	70,3	

39	0	0	-1	1	40	20	2	180	12,4	202,3	77,6	7,7	300,0	5,8	94,2	91,0	9,0	71,6
40	0	0	0	-1	40	20	4	60	2,8	189,5	87,2	20,5	300,0	1,4	98,6	81,0	19,0	64,1
41	0	0	0	0	40	20	4	120	3,4	200,1	86,6	9,9	300,0	1,7	98,3	89,8	10,2	67,8
42	0	0	0	1	40	20	4	180	9,2	202,7	80,8	7,3	300,0	4,3	95,7	91,8	8,2	70,6
43	0	0	1	-1	40	20	6	60	1,9	179,0	88,1	31,0	300,0	1,0	99,0	74,0	26,0	60,3
44	0	0	1	0	40	20	6	120	3,2	198,8	86,8	11,2	300,0	1,6	98,4	88,6	11,4	67,3
45	0	0	1	1	40	20	6	180	7,6	202,9	82,4	7,1	300,0	3,6	96,4	92,0	8,0	70,2
46	0	1	-1	-1	40	30	2	60	6,3	185,2	83,7	24,8	300,0	3,3	96,7	77,1	22,9	63,8
47	0	1	-1	0	40	30	2	120	7,4	195,8	82,6	14,2	300,0	3,6	96,4	85,4	14,6	67,7
48	0	1	-1	1	40	30	2	180	12,8	198,9	77,2	11,1	300,0	6,0	94,0	87,4	12,6	70,6
49	0	1	0	-1	40	30	4	60	4,8	179,3	85,2	30,7	300,0	2,6	97,4	73,5	26,5	61,4
50	0	1	0	0	40	30	4	120	6,2	194,6	83,8	15,4	300,0	3,1	96,9	84,5	15,5	66,9
51	0	1	0	1	40	30	4	180	12,1	199,7	77,9	10,3	300,0	5,7	94,3	88,4	11,6	70,6
52	0	1	1	-1	40	30	6	60	5,1	193,3	84,9	16,7	300,0	2,6	97,4	83,6	16,4	66,1
53	0	1	1	0	40	30	6	120	13,3	200,6	76,7	9,4	300,0	6,2	93,8	89,0	11,0	71,3
54	0	1	1	1	40	30	6	180	22,2	193,1	67,8	16,9	300,0	10,3	89,7	80,0	20,0	71,8
55	1	-1	-1	-1	46	10	2	60	7,6	195,9	82,4	14,1	300,0	3,7	96,3	85,4	14,6	67,8
56	1	-1	-1	0	46	10	2	120	12,6	202,4	77,4	7,6	300,0	5,9	94,1	91,1	8,9	71,7
57	1	-1	-1	1	46	10	2	180	15,6	202,8	74,4	7,2	300,0	7,1	92,9	91,2	8,8	72,8
58	1	-1	0	-1	46	10	4	60	9,8	193,7	80,2	16,3	300,0	4,8	95,2	83,1	16,9	67,8
59	1	-1	0	0	46	10	4	120	11,9	203,1	78,1	6,9	300,0	5,5	94,5	91,9	8,1	71,7
60	1	-1	0	1	46	10	4	180	16,8	203,6	73,2	6,4	300,0	7,6	92,4	91,9	8,1	73,5
61	1	-1	1	-1	46	10	6	60	5,6	179,5	84,4	30,5	300,0	3,0	97,0	73,4	26,6	61,7
62	1	-1	1	0	46	10	6	120	10,1	203,9	79,9	6,1	300,0	4,7	95,3	92,9	7,1	71,3
63	1	-1	1	1	46	10	6	180	14,1	204,4	75,9	5,6	300,0	6,5	93,5	93,1	6,9	72,8
64	1	0	-1	-1	46	20	2	60	12,1	201,4	77,9	8,6	300,0	5,7	94,3	90,1	9,9	71,2
65	1	0	-1	0	46	20	2	120	15,1	202,4	74,9	7,6	300,0	6,9	93,1	90,8	9,2	72,5
66	1	0	-1	1	46	20	2	180	21,7	202,5	68,3	7,5	300,0	9,7	90,3	90,0	10,0	74,7
67	1	0	0	-1	46	20	4	60	11,3	202,6	78,7	7,4	300,0	5,3	94,7	91,4	8,6	71,3
68	1	0	0	0	46	20	4	120	14,3	203,2	75,7	6,8	300,0	6,6	93,4	91,7	8,3	72,5
69	1	0	0	1	46	20	4	180	20,3	203,2	69,7	6,8	300,0	9,1	90,9	91,1	8,9	74,5
70	1	0	1	-1	46	20	6	60	10,6	203,4	79,4	6,6	300,0	5,0	95,0	92,3	7,7	71,3
71	1	0	1	0	46	20	6	120	14,4	203,9	75,6	6,1	300,0	6,6	93,4	92,6	7,4	72,8
72	1	0	1	1	46	20	6	180	17,5	203,7	72,5	6,3	300,0	7,9	92,1	92,0	8,0	73,7
73	1	1	-1	-1	46	30	2	60	15,8	199,7	74,2	10,3	300,0	7,4	92,6	87,8	12,2	71,8
74	1	1	-1	0	46	30	2	120	20,4	199,6	69,6	10,4	300,0	9,3	90,7	87,0	13,0	73,3
75	1	1	-1	1	46	30	2	180	26,1	199,6	63,9	10,4	300,0	11,6	88,4	86,0	14,0	75,2
76	1	1	0	-1	46	30	4	60	16,1	200,1	73,9	9,9	300,0	7,4	92,6	88,2	11,8	72,1
77	1	1	0	0	46	30	4	120	20,9	200,4	69,1	9,6	300,0	9,5	90,5	87,8	12,2	73,8
78	1	1	0	1	46	30	4	180	25,7	200,3	64,3	9,7	300,0	11,4	88,6	86,9	13,1	75,3
79	1	1	1	-1	46	30	6	60	15,8	201,0	74,2	9,0	300,0	7,3	92,7	89,2	10,8	72,3
80	1	1	1	0	46	30	6	120	20,0	201,1	70,0	8,9	300,0	9,0	91,0	88,8	11,2	73,7
81	1	1	1	1	46	30	6	180	20,4	201,1	69,6	8,9	300,0	9,2	90,8	88,7	11,3	73,8

i – домішки, g – насіння основна культура

Додаток К

Обробка даних експериментальних досліджень в програмному пакеті Wolfram
Cloud

Залежність відносної маси насінневої суміші в лотку ϵ'

```

M={{-1,-1,-1,-1,31.16666666666667},{-1,-1,-1,0,60.5},{-1,-1,-
1,1,67.83333333333333},{-1,-1,0,-1,38},{-1,-1,0,0,57.83333333333333},{-1,-
1,0,1,67.66666666666667},{-1,-1,1,-1,35.83333333333333},{-1,-
1,1,0,53.66666666666667},{-1,-1,1,1,67.83333333333333},{-1,0,-1,-1,51.5},{-1,0,-
1,0,64.33333333333333},{-1,0,-1,1,66.5},{-1,0,0,-1,34.83333333333333},{-
1,0,0,0,56.66666666666667},{-1,0,0,1,63.4},{-1,0,1,-1,41.6},{-
1,0,1,0,45.16666666666667},{-1,0,1,1,54.3},{-1,1,-1,-1,38.06666666666667},{-1,1,-
1,0,41.71333333333333},{-1,1,-1,1,42.23333333333333},{-1,1,0,-1,17.7},{-1,1,0,0,29.9},{-
1,1,0,1,42.03333333333333},{-1,1,1,-1,22},{-1,1,1,0,35.63333333333333},{-
1,1,1,1,41},{0,-1,-1,-1,26.4},{0,-1,-1,0,69.53333333333333},{0,-1,-1,1,70.5},{0,-1,0,-
1,59.3},{0,-1,0,0,68.9},{0,-1,0,1,70.16666666666667},{0,-1,1,-1,49.83333333333333},{0,-
1,1,0,69},{0,-1,1,1,70.56666666666667},{0,0,-1,-1,43.93333333333333},{0,0,-
1,0,70.33333333333333},{0,0,-1,1,71.56666666666666},{0,0,0,-
1,64.1},{0,0,0,0,67.83333333333333},{0,0,0,1,70.63333333333333},{0,0,1,-
1,60.3},{0,0,1,0,67.33333333333333},{0,0,1,1,70.16666666666667},{0,1,-1,-
1,63.83333333333333},{0,1,-1,0,67.73333333333333},{0,1,-
1,1,70.56666666666667},{0,1,0,-
1,61.36666666666667},{0,1,0,0,66.93333333333333},{0,1,0,1,70.6},{0,1,1,-
1,66.13333333333333},{0,1,1,0,71.3},{0,1,1,1,71.758064516129},{1,-1,-1,-
1,67.83333333333333},{1,-1,-1,0,71.68333333333333},{1,-1,-1,1,72.8},{1,-1,0,-
1,67.83333333333333},{1,-1,0,0,71.66666666666667},{1,-1,0,1,73.46666666666667},{1,-
1,1,-1,61.7},{1,-1,1,0,71.33333333333333},{1,-1,1,1,72.83333333333333},{1,0,-1,-
1,71.16666666666667},{1,0,-1,0,72.5},{1,0,-1,1,74.73333333333333},{1,0,0,-
1,71.3},{1,0,0,0,72.5},{1,0,0,1,74.5},{1,0,1,-
1,71.33333333333333},{1,0,1,0,72.76666666666667},{1,0,1,1,73.73333333333333},{1,1,-
1,-1,71.83333333333333},{1,1,-1,0,73.33333333333333},{1,1,-
1,1,75.23333333333333},{1,1,0,-
1,72.06666666666667},{1,1,0,0,73.76666666666667},{1,1,0,1,75.33333333333333},{1,1,1,-
1,72.26666666666667},{1,1,1,0,73.7},{1,1,1,1,73.83333333333333}};
nlm=NonlinearModelFit[M,a00+a10 *x1+a20 * x2+a30 * x3+a40 * x4
+a12* x1*x2+a13* x1*x3+a14* x1*x4+a23* x2*x3+a24* x2*x4+a34* x3*x4
+a11* x1^2+a22 *x2^2+a33 *x3^2+a44 *x4^2,
{a00,a10,a20,a30,a40,a12,a13,a14,a23,a24,a34,a11,a22,a33,a44 },{x1,x2,x3,x4}];
"Закодоване повне"
Normal[nlm]
"Критерій Стюдента"

```

```

nlm["ParameterTable"]
  QQ[x1_,x2_,x3_,x4_] := 69.6641975308642` + 12.558086419753069` x1 -
5.283076463560337` x1^2 + 5.563055555555552` x1 x2 - 3.527998805256853`
x2^2 + 7.084408602150534` x4 - 4.5268518518518714` x1 x4 - 3.2900537634408686` x2 x4 -
3.4463321385902477` x4^2
  "Розкадроване скорочене"
  x10=40;
  dx1=6;
  x20=20;
  dx2=10;
  x30=4;
  dx3=2;
  x40=120;
  dx4=60;
  Q[n_,tl_,tr_,t_] := QQ [ (n - x10) / dx1 , (tl - x20) / dx2 , (tr - x30) / dx3 , (t - x40) /
dx4 ] ;
  Expand[Q[n,tl,tr,t] ]
  "Оптимум"
  Opt=FindMaximum[ {Q[n,tl,tr,t],x10-dx1<=n<=x10+dx1,x20-
dx2<=tl<=x20+dx2,x30-dx3<=tr<=x30+dx3,x40-dx4<=t<=x40+dx4} , {n,x10-
dx1} , {tl,x20-dx2} , {tr,x30-dx3} , {t,x40-dx4} ]
  nopt=n/.Last[Opt];
  tlopt=tl/.Last[Opt];
  tropt=tr/.Last[Opt];
  topt=t/.Last[Opt];
  "Графіки"
  Plot3D[Q[n,tlopt,tropt,t], {n,x10-dx1,x10+dx1} , {t,x40-dx4,x40+dx4} , PlotStyle-
>{Green} , AxesLabel->{"n, об/хв", "T, c", "εt, %"} , LabelStyle->Directive[FontSize-
>14,FontFamily->"Times"] , Mesh->20,PlotTheme->"Detailed",PlotLegends->Automatic]
  Plot3D[Q[nopt,tl,tr,topt], {tl,x20-dx2,x20+dx2} , {tr,x30-dx3,x30+dx3} , PlotStyle-
>{Green} , AxesLabel->{"TL, c", "TR, c", "εt, %"} , LabelStyle->Directive[FontSize-
>14,FontFamily->"Times"] , Mesh->20,PlotTheme->"Detailed",PlotLegends->Automatic]

```

Залежність відносного вмісту домішок в насіннєвій суміші лотка ε^t

```

M={ {-1,-1,-1,-1,1.81973308163265}, {-1,-1,-1,0,1.57834620430108}, {-1,-1,-
1,1,1.79029823076923}, {-1,-1,0,-1,1.38702592827004}, {-1,-1,0,0,1.52688275280899}, {-
1,-1,0,1,1.68797656626506}, {-1,-1,1,-1,1.06706957142857}, {-1,-
1,1,0,1.22487060725076}, {-1,-1,1,1,2.06294869230769}, {-1,0,-1,-
1,2.15116281761006}, {-1,0,-1,0,2.78805478481013}, {-1,0,-1,1,2.99282023529412}, {-
1,0,0,-1,1.63650359633028}, {-1,0,0,0,2.0373868538682}, {-
1,0,0,1,2.05092616127375}, {-1,0,1,-1,1.83875776643465}, {-

```

```

1,0,1,0,2.26191542857143},{-1,0,1,1,2.6254586953405},{-1,1,-1,-
1,3.05751499494524},{-1,1,-1,0,3.29845179173095},{-1,1,-1,1,3.03343553658537},{-
1,1,0,-1,3.50199966666667},{-1,1,0,0,2.9911185626327},{-
1,1,0,1,3.22602978407351},{-1,1,1,-1,2.82510885815603},{-
1,1,1,0,2.47495542728905},{-1,1,1,1,2.5080458627451},{0,-1,-1,-
1,1.6679519390681},{0,-1,-1,0,2.95195039840451},{0,-1,-1,1,4.27249196296296},{0,-
1,0,-1,1.73262885964912},{0,-1,0,0,1.9120546969697},{0,-
1,0,1,3.29066639534884},{0,-1,1,-1,0.945316324675325},{0,-
1,1,0,2.03908071631206},{0,-1,1,1,3.71962342368178},{0,0,-1,-
1,1.74233471460015},{0,0,-1,0,4.21364731322506},{0,0,-
1,1,5.76493272992701},{0,0,0,-
1,1.43185304065041},{0,0,0,0,1.65855723076923},{0,0,0,1,4.32011702033272},{0,0,1,-
1,1.04909373031284},{0,0,1,0,1.55973625181598},{0,0,1,1,3.62404167441861},{0,1,-
1,-1,3.31498108163265},{0,1,-1,0,3.62326520414059},{0,1,-
1,1,6.04251983071231},{0,1,0,-
1,2.61939980805939},{0,1,0,0,3.09355267851924},{0,1,0,1,5.69657895469256},{0,1,1,-
1,2.55945726022671},{0,1,1,0,6.23676812087912},{0,1,1,1,10.3061135706737},{1,-1,-
1,-1,3.71337515384615},{1,-1,-1,0,5.86430012275108},{1,-1,-
1,1,7.14174075414984},{1,-1,0,-1,4.81123884615385},{1,-
1,0,0,5.52089365603645},{1,-1,0,1,7.6347159470876},{1,-1,1,-
1,3.04680133755274},{1,-1,1,0,4.73963413501144},{1,-1,1,1,6.45023741255605},{1,0,-
1,-1,5.65067236697248},{1,0,-1,0,6.92763740540541},{1,0,-
1,1,9.69888263401837},{1,0,0,-
1,5.29866712087912},{1,0,0,0,6.58319340540541},{1,0,0,1,9.07252484210526},{1,0,1,-
1,4.95233713501144},{1,0,1,0,6.57840683662478},{1,0,1,1,7.92240026938414},{1,1,-
1,-1,7.35023154545455},{1,1,-1,0,9.26357432739421},{1,1,-
1,1,11.5797552797567},{1,1,0,-
1,7.44447436837336},{1,1,0,0,9.45767578122232},{1,1,0,1,11.3540423275488},{1,1,1,-
1,7.26726721961139},{1,1,1,0,9.03078261702128},{1,1,1,1,9.19553501769911}};
nlm=NonlinearModelFit[M,a00+a10 *x1+a20 * x2+a30 * x3+a40 * x4
+a12* x1*x2+a13* x1*x3+a14* x1*x4+a23* x2*x3+a24* x2*x4+a34* x3*x4
+a11* x1^2+a22 *x2^2+a33 *x3^2+a44 *x4^2,
{a00,a10,a20,a30,a40,a12,a13,a14,a23,a24,a34,a11,a22,a33,a44 },{x1,x2,x3,x4}];
"Закодоване повне"
Normal[nlm]
"Критерій Стюдента"
nlm["ParameterTable"]
QQ[x1_,x2_,x3_,x4_] :=2.8833927370418575` +2.446411100104471`
x1+1.3373771566500687` x1^2+1.2361626252072393` x2+0.5624692296984992` x1
x2+0.39052676060946584` x2^2-0.24411663850201257` x3+1.1700352162501235`
x4+0.77282516409085` x1 x4
"Розкадоване скорочене"
x10=40;
dx1=6;

```

```

x20=20;
dx2=10;
x30=4;
dx3=2;
x40=120;
dx4=60;
Q[n_,tl_,tr_,t_] := QQ [ (n - x10) / dx1 , (tl - x20) / dx2 , (tr - x30) / dx3 , (t - x40) /
dx4 ] ;
Expand[Q[n,tl,tr,t] ]
"Оптимум"
Opt=FindMinimum[ {Q[n,tl,tr,t],x10-dx1<=n<=x10+dx1,x20-
dx2<=tl<=x20+dx2,x30-dx3<=tr<=x30+dx3,x40-dx4<=t<=x40+dx4} , {n,x10-
dx1} , {tl,x20-dx2} , {tr,x30-dx3} , {t,x40-dx4} ]
nopt=n/.Last[Opt];
tlopt=tl/.Last[Opt];
tropt=tr/.Last[Opt];
topt=t/.Last[Opt];
"Графіки"
Plot3D[Q[n,tlopt,tropt,t], {n,x10-dx1,x10+dx1} , {t,x40-dx4,x40+dx4} ,PlotStyle-
>{Orange}, AxesLabel->{"n, об/хв","T, c", "€it, % "},LabelStyle->Directive[FontSize-
>14,FontFamily->"Times"],Mesh->20,PlotTheme->"Detailed",PlotLegends->Automatic]
Plot3D[Q[nopt,tl,tr,topt], {tl,x20-dx2,x20+dx2} , {tr,x30-dx3,x30+dx3} ,PlotStyle-
>{Orange}, AxesLabel->{"TL, c","TR, c", "€it, % "},LabelStyle->Directive[FontSize-
>14,FontFamily->"Times"],Mesh->20,PlotTheme->"Detailed",PlotLegends->Automatic]

```

*Залежність відносного вмісту насіння основної культури в насінневі суміші
циліндра ϵ_g^c*

```

M={ {-1,-1,-1,-1,57.2404118311509}, {-1,-1,-1,0,26.4680998825371}, {-1,-1,-
1,1,10.5111470462336}, {-1,-1,0,-1,52.4630158915203}, {-1,-1,0,0,30.9479380048408}, {-
1,-1,0,1,10.7490643603279}, {-1,-1,1,-1,53.8426492411874}, {-1,-
1,1,0,36.6705335810602}, {-1,-1,1,1,11.0861145998406}, {-1,0,-1,-
1,40.4285543321014}, {-1,0,-1,0,20.9167717146575}, {-1,0,-1,1,16.3887327058824}, {-
1,0,0,-1,54.8389494926676}, {-1,0,0,0,33.4335058858276}, {-
1,0,0,1,21.5854841154305}, {-1,0,1,-1,49.9399370391041}, {-
1,0,1,0,47.1519121007382}, {-1,0,1,1,37.4740132857109}, {-1,1,-1,-
1,53.4400872573883}, {-1,1,-1,0,50.8908169805399}, {-1,1,-1,1,50.2846871464822}, {-
1,1,0,-1,64.3011591020656}, {-1,1,0,0,58.479806633705}, {-1,1,0,1,50.585407451246}, {-
1,1,1,-1,62.3352871138389}, {-1,1,1,0,54.76215813142}, {-
1,1,1,1,50.8954217012296}, {0,-1,-1,-1,59.8374175433614}, {0,-1,-
1,0,8.26889336003482}, {0,-1,-1,1,8.515616386064}, {0,-1,0,-1,28.8143707955084}, {0,-
1,0,0,7.77300863733799}, {0,-1,0,1,7.1808410750942}, {0,-1,1,-
1,41.1383707012556}, {0,-1,1,0,7.76440546533977}, {0,-1,1,1,6.9925739387705}, {0,0,-

```

```

1,-1,47.8575488429507},{0,0,-1,0,8.86606273135377},{0,0,-
1,1,9.00036409279408},{0,0,0,-
1,18.9911359305206},{0,0,0,0,10.2333305332802},{0,0,0,1,8.23419746434164},{0,0,1,-
1,26.0267091168228},{0,0,1,0,11.378231865988},{0,0,1,1,7.9649248320125},{0,1,-1,-
1,22.9015564712687},{0,1,-1,0,14.630655883072},{0,1,-1,1,12.5617378047768},{0,1,0,-
1,26.5076057348035},{0,1,0,0,15.5361429218413},{0,1,0,1,11.6387236122889},{0,1,1,-
1,16.4153181144584},{0,1,1,0,10.9645145302676},{0,1,1,1,19.9611075248014},{1,-1,-
1,-1,14.5665476042248},{1,-1,-1,0,8.90073856854176},{1,-1,-
1,1,8.8205414302246},{1,-1,0,-1,16.8817316600239},{1,-1,0,0,8.08226042409219},{1,-
1,0,1,8.07401249670987},{1,-1,1,-1,26.5793118153265},{1,-
1,1,0,7.14281052200521},{1,-1,1,1,6.86351993427604},{1,0,-1,-
1,9.9007924895795},{1,0,-1,0,9.17286225061428},{1,0,-1,1,9.95368715761107},{1,0,0,-
1,8.6339709309645},{1,0,0,0,8.26478261425062},{1,0,0,1,8.85894512693498},{1,0,1,-
1,7.6720947313075},{1,0,1,0,7.41819109467791},{1,0,1,1,8.0258241064438},{1,1,-1,-
1,12.2363893259817},{1,1,-1,0,12.9748294003341},{1,1,-
1,1,14.0450978013606},{1,1,0,-
1,11.8078205064716},{1,1,0,0,12.2361327876048},{1,1,0,1,13.0542373787301},{1,1,1,-
1,10.7637443895643},{1,1,1,0,11.2383528089152},{1,1,1,1,11.2969554958006}}];
nlm=NonlinearModelFit[M,a00+a10 *x1+a20 * x2+a30 * x3+a40 * x4
+a12* x1*x2+a13* x1*x3+a14* x1*x4+a23* x2*x3+a24* x2*x4+a34* x3*x4
+a11* x1^2+a22 *x2^2+a33 *x3^2+a44 *x4^2,
{a00,a10,a20,a30,a40,a12,a13,a14,a23,a24,a34,a11,a22,a33,a44 },{x1,x2,x3,x4}];
"Закодоване повне"
Normal[nlm]
"Критерій Стюдента"
nlm["ParameterTable"]
QQ[x1_,x2_,x3_,x4_] :=10.95514799950261` -15.086027440299302`
x1+8.327168882601631` x1^2+3.4179593928401255` x2-5.61816032332996` x1
x2+4.290716067370533` x2^2-8.439990887666655` x4+5.533899898980221` x1
x4+6.282911214358141` x2 x4+4.737592026797877` x4^2
"Розкадоване скорочене"
x10=40;
dx1=6;
x20=20;
dx2=10;
x30=4;
dx3=2;
x40=120;
dx4=60;
Q[n_,tl_,tr_,t_] := QQ [ (n - x10 )/ dx1 , (tl - x20 )/ dx2 , (tr - x30 )/ dx3 , (t - x40 )/
dx4 ] ;
Expand[Q[n,tl,tr,t] ]
"Оптимум"

```

```

Opt=FindMinimum[{Q[n,tl,tr,t],x10-dx1<=n<=x10+dx1,x20-
dx2<=tl<=x20+dx2,x30-dx3<=tr<=x30+dx3,x40-dx4<=t<=x40+dx4},{n,x10-
dx1},{tl,x20-dx2},{tr,x30-dx3},{t,x40-dx4}]
nopt=n/.Last[Opt];
tlopt=tl/.Last[Opt];
tropt=tr/.Last[Opt];
topt=t/.Last[Opt];
"Графіки"
Plot3D[Q[n,tlopt,tropt,t],{n,x10-dx1,x10+dx1},{t,x40-dx4,x40+dx4},PlotStyle-
>{Red}, AxesLabel->{"n, об/хв","T, c","εг, %"},LabelStyle->Directive[FontSize-
>14,FontFamily->"Times"],Mesh->20,PlotTheme->"Detailed",PlotLegends->Automatic]
Plot3D[Q[nopt,tl,tr,topt],{tl,x20-dx2,x20+dx2},{tr,x30-dx3,x30+dx3},PlotStyle-
>{Red}, AxesLabel->{"TL, c","TR, c","εг, %"},LabelStyle->Directive[FontSize-
>14,FontFamily->"Times"],Mesh->20,PlotTheme->"Detailed",PlotLegends->Automatic]

```

Вирішення компромісної задачі

```

Eit [n_,tl_,tr_,t_] :=61.05484003006692` -3.009312184912524`
n+0.03714936546250191` n2-0.06636887573925906` t+0.002146736566919028` n t-
0.4075739281887285` tl+0.009374487161641654` n tl+0.0039052676060946584` tl2-
0.12205831925100628` tr;
Egc [n_,tl_,tr_,t_] :=551.7905269495553` -20.991070837714705`
n+0.2313102467389342` n2-1.280814123612932` t+0.015371944163833947` n
t+0.0013159977852216325` t2+1.1143674850174774` tl-0.09363600538883265` n
tl+0.010471518690596903` t tl+0.04290716067370533` tl2;
Et [n_,tl_,tr_,t_] :=-290.2700836320196`+13.487783087747257` n-
0.14675212398778714` n2+0.9604809504845402` t-0.01257458847736631` n t-
0.0009573144829417354` t2-1.639493428912786` tl+0.09271759259259253` n tl-
0.005483422939068115` t tl-0.03527998805256853` tl2;
x10=40;
dx1=6;
x20=20;
dx2=10;
x30=4;
dx3=2;
x40=120;
dx4=60;
Eitmmin = FindMinimum[{Eit [ n,tl,tr,t ],x10-dx1<=n<=x10+dx1,x20-
dx2<=tl<=x20+dx2,x30-dx3<=tr<=x30+dx3,x40-dx4<=t<=x40+dx4},{n,x10-
0dx1},{tl,x20-0dx2},{tr,x30-0dx3},{t,x40-0dx4}];
Eitmmax = FindMaximum[{Eit [ n,tl,tr,t ],x10-dx1<=n<=x10+dx1,x20-
dx2<=tl<=x20+dx2,x30-dx3<=tr<=x30+dx3,x40-dx4<=t<=x40+dx4},{n,x10-
0dx1},{tl,x20-0dx2},{tr,x30-0dx3},{t,x40-0dx4}];

```

```

Egcmmin = FindMinimum[{Egc [ n,tl,tr,t ],x10-dx1<=n<=x10+dx1,x20-
dx2<=tl<=x20+dx2,x30-dx3<=tr<=x30+dx3,x40-dx4<=t<=x40+dx4},{n,x10-
0dx1},{tl,x20-0dx2},{tr,x30-0dx3},{t,x40-0dx4}];
Egcmmax = FindMaximum[{Egc [ n,tl,tr,t ],x10-dx1<=n<=x10+dx1,x20-
dx2<=tl<=x20+dx2,x30-dx3<=tr<=x30+dx3,x40-dx4<=t<=x40+dx4},{n,x10-
0dx1},{tl,x20-0dx2},{tr,x30-0dx3},{t,x40-0dx4}];
Etmmin = FindMinimum[{Et [ n,tl,tr,t ],x10-dx1<=n<=x10+dx1,x20-
dx2<=tl<=x20+dx2,x30-dx3<=tr<=x30+dx3,x40-dx4<=t<=x40+dx4},{n,x10-
0dx1},{tl,x20-0dx2},{tr,x30-0dx3},{t,x40-0dx4}];
Etmmax = FindMaximum[{Et [ n,tl,tr,t ],x10-dx1<=n<=x10+dx1,x20-
dx2<=tl<=x20+dx2,x30-dx3<=tr<=x30+dx3,x40-dx4<=t<=x40+dx4},{n,x10-
0dx1},{tl,x20-0dx2},{tr,x30-0dx3},{t,x40-0dx4}];
Eitmin =Eit [ n/.Last[Eitmmin] , tl/.Last[Eitmmin] , tr/.Last[Eitmmin] , t/.Last[
Eitmmin] ] ;
Eitmax =Eit [ n/.Last[Eitmmax] , tl/.Last[Eitmmax] , tr/.Last[Eitmmax] , t/.Last[
Eitmmax] ] ;
Egcmmin =Egc [ n/.Last[Egcmmin] , tl/.Last[Egcmmin] , tr/.Last[Egcmmin] , t/.Last[
Egcmmin] ] ;
Egcmmax =Egc [ n/.Last[Egcmmax] , tl/.Last[Egcmmax] , tr/.Last[Egcmmax] ,
t/.Last[Egcmmax] ] ;
Etmmin =Et [ n/.Last[Etmmin] , tl/.Last[Etmmin] , tr/.Last[Etmmin] , t/.Last[
Etmmin] ] ;
Etmmax =Et [ n/.Last[Etmmax] , tl/.Last[Etmmax] , tr/.Last[Etmmax] , t/.Last[
Etmmax] ] ;
"Оптимум"
Opt=FindMinimum[{
((Eit [ n,tl,tr,t ] - Eitmin) / (Eitmax-Eitmin) )
((Egc [ n,tl,tr,t ] - Egcmmin) / (Egcmmax-Egcmmin) )
((Etmmax-Et [ n,tl,tr,t ] ) / (Etmmax-Etmmin) ),
Eit [ n,tl,tr,t ] <=1,
x10-dx1<=n<=x10+dx1,x20-dx2<=tl<=x20+dx2,x30-dx3<=tr<=x30+dx3,x40-
dx4<=t<=x40+dx4},{n,x10-dx1},{tl,x20-0dx2},{tr,x30-0dx3},{t,x40-dx4}]
nopt=n/.Last[Opt];
tlopt=tl/.Last[Opt];
tropt=tr/.Last[Opt];
topt=t/.Last[Opt];
Eit [ nopt , tlopt , tropt , topt ]
Egc [ nopt , tlopt , tropt , topt ]
Et [ nopt , tlopt , tropt , topt ]

```


Додаток Л

УДК 631.563

№ держреєстрації № 0120U100322

Міністерство освіти і науки України
Дніпровський державний аграрно-економічний університет (ДДАЕУ)
49000, м. Дніпро, вул. Сергія Єфремова, 25

ЗАТВЕРДЖУЮ

Проректор з наукової та інноваційної
діяльності ДДАЕУ,
доктор с.-г. наук, проф.,

Юрій ТКАЛІЧ

8 / 12.2022



ЗВІТ

ПРО НАУКОВО-ДОСЛІДНУ РОБОТУ

ТЕХНІКО-ТЕХНОЛОГІЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ КОМПЛЕКСНОЇ
БЕЗВІДХОДНОЇ ПЕРЕРОБКИ РОСЛИННОЇ СИРОВИНИ У БІОЛОГІЧНО
ЦІННІ ХАРЧОВІ ПРОДУКТИ І КОРМОВІ ДОБАВКИ
(остаточний)

Начальник відділу науки та інновацій
ДДАЕУ, канд. хім. наук, доц.

Андрій ТОКАР

8.12.2022

Керівник НДР
канд. техн. наук, доц.

Світлана МИКОЛЕНКО

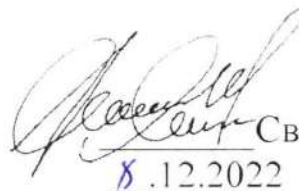
8.12.2022

2022

Рукопис закінчено 8 грудня 2022 р.
Результати роботи розглянуто науково-технічною радою ДДАЕУ,
протокол від 8 грудня 2022 р. № 3

СПИСОК АВТОРІВ

Керівник НДР,
провідний науковий співробітник,
канд. техн. наук, доц.



Світлана МИКОЛЕНКО

8.12.2022

(вступ, розділи
4.1, 4.2, 6, 7,
висновки)

Відповідальний виконавець:
старший науковий співробітник,
канд. техн. наук

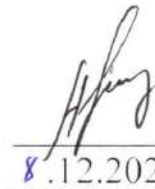


Наталія СОВА

8.12.2022

(розділи 1.3, 2.1-
2.5, висновки)

Виконавці:
Провідний науковий співробітник,
д-р техн. наук, старш. дослід.



Ельчин АЛІЄВ

8.12.2022

(розділи 2.6, 3, 4.1-
4.2, висновки)

Провідний науковий співробітник,
канд. наук з держ. упр., доц.

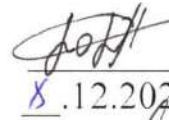


Людмила БЕЗУГЛА

8.12.2022

(розділ 1.1, 1.2,
висновки)

Старший науковий співробітник,
канд. техн. наук



Денис ДОЛГІХ

8.12.2022

(розділ 3.2)

Науковий співробітник



Ольга АЛІЄВА

8.12.2022

(розділи 3.2, 4.1,
4.2)

Науковий співробітник

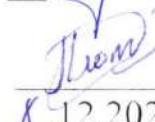


Ольга ПІДДУБЦЕВА

8.12.2022

(розділи 6.1, 6.2)

Науковий співробітник

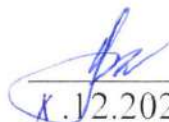


Любов ПЛОТКА

8.12.2022

(розділи 6.3, 6.4)

Молодший науковий співробітник

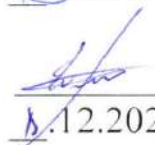


Яна ГЕЗЬ

8.12.2022

(розділ 3.5)

Молодший науковий співробітник




Дмитро ТИМЧАК


8.12.2022

(розділ 5)


Молодший науковий співробітник


Крістіна ХУДАЙБЕРДІЄВА
8.12.2022 (розділи 6.4, 6.5)

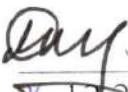
Молодший науковий співробітник


Кристина ЛУПКО
8.12.2022 (розділи 3.1, 4.3)

Молодший науковий співробітник


Микола ЛІНКО
8.12.2022 (розділ 3.4)

Технік


Роман МАЛЄГІН
8.12.2022 (розділи 2.6, 3.3)

Додаток М

УДК 633.85:631.3

№ держреєстрації 0120U105450

Національна академія аграрних наук України
Інститут олійних культур (ІОК НААН)
 69055, Запорізька обл., Запорізький р-н, сел. Сонячне, вул. Інститутська, 1
 тел./факс: (061)223-99-50

ЗАТВЕРДЖУЮ

В.о. директора ІОК НААН,
канд. с.-г. наук,

Ю. М. Прядко

**ЗВІТ**

про науково-дослідну роботу
за 2022 р.

ПНД 18 ОЛІЙНІ КУЛЬТУРИ

Завдання: 18.00.00.07.Ф Техніко-технологічне оснащення первинного
насінництва олійних культур

Етап 2022 р.: Розробити адаптивну механотронну систему цільового поділу
та відбору насіннєвого матеріалу олійних культур за
спадковими ознаками

Керівник НДР
д-р техн. наук, старш. дослідник

Е.Б. Алієв


2022

Рукопис закінчено 10.12.2022 2022 р.
 Результати роботи розглянуто Вченою радою ІОК НААН,
 протокол від 10.12.2022 2022 р. № 4

СПИСОК АВТОРІВ

Керівник НДР, відповідальний виконавець:

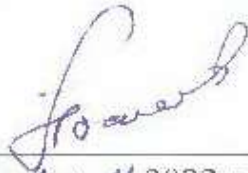
головний науковий співробітник відділу техніко-технологічного забезпечення насінництва, доктор технічних наук, старший дослідник


« 3 » 11 2022 р.

Е. Б. Алієв
(вступ, розділи 1-4, висновки)

Виконавці:

Завідувач відділу агротехнологій та впровадження, доктор сільсько-господарських наук, старший науковий співробітник


« 3 » 11 2022 р.

О. І. Поляков
(вступ, розділ 2.2, висновки)

Старший науковий співробітник відділу техніко-технологічного забезпечення насінництва


« 3 » 11 2022 р.

О. М. Пацула
(розділ 2.2, 3.2)

Старший науковий співробітник лабораторії трансферу інновацій та інтелектуальної власності


« 3 » 11 2022 р.


О. В. Бєлка
(розділ 1.2)

Старший науковий співробітник відділу агротехнологій та впровадження


« 3 » 11 2022 р.

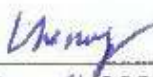
Н. М. Усова
(розділ 4.1)

Старший науковий співробітник відділу агротехнологій та впровадження


« 3 » 11 2022 р.

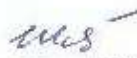
О. В. Нікітенко
(розділ 4.1)

Науковий співробітник відділу агротехнологій та впровадження


« 3 » 11 2022 р.


Т. Ф. Цапик
(розділ 4.1)

Молодший науковий співробітник відділу насінництва


« 3 » 11 2022 р.

С. В. Школова
(розділ 3.2)

Молодший науковий співробітник відділу техніко-технологічного забезпечення насінництва


« 3 » 11 2022 р.

К. О. Лупко
(розділ 1.1, 2.1, висновки)

Здобувач вищої освіти


« 3 » 11 2022 р.

Є. Ю. Доценко
(розділ 4.2)



НААН
ІНСТИТУТ ОЛІЙНИХ КУЛЬТУР
НАЦІОНАЛЬНОЇ АКАДЕМІЇ АГРАРНИХ НАУК УКРАЇНИ
ІОК НААН

вул. Інститутська, 1, сел. Сонячне, Запорізький район, Запорізька обл., 70417, Україна
 Тел./факс: (061) 223 99 50, E-mail: iocnaas@gmail.com, ЄДРПОУ 01296051

№ _____
 На № _____ від _____

Довідка

Видана Лупко Кристині Олегівні, про те, що вона працює в **Інституті олійних культур Національної академії аграрних наук України** на посаді молодшого наукового співробітника відділу техніко-технологічного забезпечення насінництва на 0,5 ставки за зовнішнім сумісництвом з 1 вересня 2022 р. по теперішній час.

Лупко К. О. є виконавцем науково-дослідної роботи **18.00.00.07.Ф «Техніко-технологічне оснащення первинного насінництва олійних культур»** (№ ДР 0120U105450), етапу 2022 р. «Розробити адаптивну механотронну систему цільового поділу та відбору насінневого матеріалу олійних культур за спадковими ознаками». Лупко К. О. провела аналіз конструкцій трієрів для сепарації насінневої суміші, обґрунтувала конструктивно-технологічну схему механотронної системи трієра, розробила методику і провела чисельне моделювання трієрів для сепарації насінневої суміші, розробила методику і провела лабораторні дослідження з визначення фізико-механічних властивостей олійних культур. Об'єм наукових досліджень, виконуваних Лупко К. О. на зазначеній посаді складає – 100 %.

Довідка видана для пред'явлення за місцем вимоги.



Заступник директора з виробництва

Вчений секретар

Провідний інспектор відділу кадрів

П. Ф. Балабай

В. М. Журавель

О. І. Жигунова

Додаток Н

ДОГОВІР про науково-технічне співробітництво

м. Запоріжжя
«14» 01 2022 р.

м. Дніпро
«14» 01 2022 р.

Інститут олійних культур Національної академії аграрних наук України, в особі директора Алієва Ельчина Бахтияра огли, що діє на підставі Статуту, що іменується подальшому Сторона 1,

та **Дніпровський державний аграрно-економічний університет**, в особі ректора Кобця Анатолія Степановича, який діє на підставі Статуту та іменується в подальшому Сторона 2, разом іменовані Сторони, уклали цей Договір про наступне:

1. ПРЕДМЕТ ДОГОВОРУ

1.1. На умовах цього Договору Сторони домовились здійснювати науково-технічне співробітництво у галузі розробки і удосконалення техніко-технологічного оснащення первинного насінництва олійних культур та процесів безвідходної переробки товарного насіння на базі відділу техніко-технологічного забезпечення насінництва Інституту олійних культур Національної академії аграрних наук України та інженерно-технологічного факультету Дніпровського державного аграрно-економічного університету, визначених у пункті 1.2 цього Договору.

1.2. Виконання цього договору здійснюється зі сторони:

1.2.1. **Інституту олійних культур Національної академії аграрних наук України** здійснюється на базі відділу техніко-технологічного забезпечення насінництва. Відповідальні особи за виконання цього Договору зі сторони Інституту олійних культур Національної академії аграрних наук України є директор, провідний науковий співробітник – Алієв Ельчин Бахтияр огли, д-р техн. наук, старший дослідник; старший науковий співробітник – Пацула Олександр Миколайович.

1.2.2. **Дніпровського державного аграрно-економічного університету** здійснюється на базі інженерно-технологічного факультету. Відповідальні особи за виконання цього Договору зі сторони Дніпровського державного аграрно-економічного університету є декан – Пугач Андрій Миколайович, д-р наук з держ. упр., проф.; завідувач кафедри механізації виробничих процесів у тваринництві – Дудін Володимир Юрійович, канд. техн. наук, доц.; доцент кафедри технології зберігання та переробки сільськогосподарської продукції – Сова Наталія Анатоліївна, канд. техн. наук, здобувачі ступеня доктора філософії – Лупко Кристина Олегівна, Безверхній Петро Євгенович.

1.3. Сторона 1 та Сторона 2 домовились, що структурні підрозділи на базі яких здійснюється виконання цього Договору іменуються спільно в межах цього договору як інженерно-технологічна лабораторія.

1.4. При виконанні цього договору Сторони зобов'язуються дотримуватись вимог Закону України «Про наукову і науково-технічну діяльність».

1.5. Взаємодія між Сторонами здійснюється без проведення взаєморозрахунків і прийняття фінансових зобов'язань. При отриманні позитивних попередніх результатів роботи Сторони оформляють окремий договір для подальшої взаємодії та визначення авторства кожної зі сторін.

1.6. Авторство виконаних спільних наукових досліджень належить науковим співробітникам Сторін, залученим Сторонами для виконання цього Договору та визначені у пункті 1.2.1 та 1.2.2 цього Договору (далі за текстом Договору – відповідальні особи або члени інженерно-технологічної лабораторії).

1.7. Цим Договором Сторони погодили використання кожної сторони окремо у власних наукових цілях, у тому числі і шляхом публікації у наукових виданнях, результатів наукових досліджень за цим договором, отриманих на будь-якій стадії його виконання, з дотриманням умов цього договору.

2. ПРАВА ТА ОBOB'ЯЗКИ СТОРІН

2.1. Виконання цього Договору буде здійснюватися спільно Сторонами в наступних формах:

2.1.1. Сторона 2 зобов'язується направляти для здійснення науково-виробничих практик здобувачів вищої освіти на базі Сторони 1.

2.1.2. Сторона 2 зобов'язується забезпечити навчання основам машин і засобів механізації сільськогосподарського виробництва під час виконання практичних досліджень.

2.1.3. Сторони спільно проводять навчання здобувачів вищої освіти та збір наукової інформації для курсових, дипломних і кваліфікаційних робіт та наукових публікацій.

2.1.4. Для виконання цього Договору Сторони можуть спільно використовувати належне кожній Стороні майно без зміни його форми власності, власника та функціонального призначення.

2.1.5. Необхідні послуги лабораторій Сторін пов'язані з виконанням наукових робіт: магістерських, аспірантських, докторантських та інших досліджень спочатку узгоджуються на спільній нараді відповідальних осіб визначені у пункті 1.2.1 та 1.2.2 цього Договору з попереднім обговоренням долі авторства. Результати спільних досліджень в межах цього Договору перед публікацією також повинні пройти спільне обговорення і погодження на публікацію від усіх відповідальних осіб за цим Договором.

2.1.6. Виконання роботи здійснюється в межах основного робочого часу членів інженерно-технологічної лабораторії без додаткового фінансування на базі обох сторін.

2.1.7. Виконання умов цього договору здійснюється в межах Робочої програми інженерно-технологічної лабораторії, яка погоджується відповідальними особами.

2.1.8. Прийняття усіх рішень (погоджень) здійснюється відповідальними особами на засіданнях інженерно-технологічної лабораторії, яке є правомочним за присутності на ньому не менше двох третин членів лабораторії. Всі рішення, що приймаються на засіданнях інженерно-технологічної лабораторії, оформлюються протоколом та приймаються простою більшістю голосів членів лабораторії.

2.1.9. Сторони зобов'язуються дотримуватися наукових, ділових та інших інтересів один одного, формувати і погоджувати плани, програми, графіки, методичні вказівки та рекомендації, необхідні для організації та ефективного виконання спільних науково-дослідних та освітніх робіт і програм.

2.1.10. На виконання умов цього Договору Сторони зобов'язуються:

- виступити зі спільними доповідями на науково-практичних конференціях;
- своєчасно обмінюватися новою інформацією з вищевказаних проблем;
- розробляти та впроваджувати в практику нові результати сумісних досліджень;
- підвищувати наукову кваліфікацію молодих вчених шляхом обговорення отриманих результатів на спільних науково-практичних конференціях.

3. ПРАВА НА РЕЗУЛЬТАТИ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ ДІЯЛЬНОСТІ. ДОТРИМАННЯ ВИНЯТКОВОГО ПРАВА ТРЕТІХ ОСІБ

3.1. Цей Договір не регулює розподіл інтелектуальних прав між Сторонами.

3.2. Питання використання результатів спільних наукових досліджень будуть узгоджуватися Сторонами в кожному конкретному випадку окремо, шляхом укладення окремих угод.

3.3. Сторони зобов'язуються вжити необхідних заходів для того, щоб їх діяльність, пов'язана з предметом цього договору, не обмежувала прав третіх осіб. З цією метою Сторони будуть обмінюватися інформацією про діючі та опубліковані охоронні документи, що належать третім особам і безпосередньо зачіпають предмет договору, проводити спільні консультації для прийняття узгоджених рішень про правову охорону і використання об'єктів інтелектуальної власності.

4. ПОРЯДОК ВИРІШЕННЯ СПОРІВ І РОЗБІЖНОСТЕЙ

4.1. У разі виникнення суперечок і розбіжностей з питань, що є предметом цього договору, або у зв'язку з ним, Сторони вживатимуть усіх заходів щодо їх вирішення шляхом переговорів, а при недосягненні згоди – у встановленому чинним законодавством України порядку.

5. ТЕРМІН ДІЇ ДОГОВОРУ

5.1. Цей договір вступає в силу з дня його підписання Сторонами і діє до 31 грудня 2025 року. Якщо за місяць до закінчення терміну дії договору жодна із Сторін не заявить у письмовій формі про його розірвання, дія договору автоматично пролонгується на той же термін і на тих самих умовах.

5.2. Дострокове припинення дії даного договору з ініціативи однієї зі Сторін можливо в разі порушення однією із Сторін умов Договору, або у разі неможливості цієї Стороною виконати свої зобов'язання за договором. При цьому Сторона – ініціатор розірвання договору спрямовує кожній зі Сторін письмове повідомлення з поясненням причин розірвання. Договір вважається розірваним через 2 (два) місяці після отримання повідомлення всіма Сторонами, якщо протягом цього терміну Сторони не зможуть усунути причини дострокового розірвання.

5.3. Кожна із Сторін має право відмовитися від цього договору, письмово повідомивши про це іншу Сторону не менше ніж за 2 (два) місяці до розірвання договору.

5.4. Участь в цьому договорі не обмежує права Сторін на участь в будь-яких інших формах науково-дослідного співробітництва.

5.5. Всі зміни і доповнення до договору дійсні, якщо вони складені в письмовій формі і підписані всіма Сторонами.

5.6. Цей договір складено в 2 (Двох) примірниках, які мають однакову юридичну силу, по одному примірнику для кожної із Сторін.

6. АДРЕСИ СТОРІН

**Інститут олійних культур
Національної академії
аграрних наук України**
70417, Запорізька область,
Запорізький район, с. Сонячне,
вул. Інститутська 1
тел. / факс +380 612239950
e-mail: iocnaas@gmail.com



Директор _____ Ельчин АЛІЄВ

**Дніпровський державний
аграрно-економічний
університет**

49600, м. Дніпро,
вул. Сергія Єфремова, 25
тел. (056) 744-81-32
e-mail: info@dsau.dp.ua



Ректор _____ Анатолій КОБЕЦЬ

Додаток О

ЗАТВЕРДЖУЮ

Заступник директора з виробництва
Інституту олійних культур
Національної академії аграрних наук
України (ІОК НААН)

 П. Ф. Балабай
«22» листопада 2023 р.



Довідка

про використання результатів дослідження


Лабораторний циліндричний чарунковий трієр для сепарації насіння дрібнонасінневих олійних культур у складі мехатронної системи (автори Алієв Е. Б., Лупко К. О.), розроблений у відповідності з планами науково-дослідної роботи «18.00.00.07.Ф Техніко-технологічне оснащення первинного насінництва олійних культур» (№ ДР 0120U105450), використовується у наукових дослідженнях в області селекції і генетики олійних культур.

Вищезазначений пристрій дозволяє виконувати технологічні процеси сепарації, очищення й розділення зернових і насінневих сумішей за геометричними розмірами із більш високою продуктивністю. Маніпуляції із режимними параметрами адаптивного селекційно-насінницького трієра дозволяють підлаштовувати його до зміни складу насінної суміші, тим самим підвищуючи якість сепарації. Окрім цього, через автоматичне підлаштування режимних параметрів адаптивного селекційно-насінницького трієра, участь оператора установки в процесі сепарації практично нівелюється, що зменшує трудові витрати.

Заступник директора з наукової роботи
канд. біол. наук, старш. наук. співр.

 К. В. Ведмедева

Завідувач відділу агротехнології та
впровадження,
д-р с.-г. наук, старш. наук. співр.

 О. І. Поляков

Завідувач відділу селекції,
д-р с.-г. наук, старш. наук. співр.

 А. І. Сорока

Додаток П

ЗАТВЕРДЖУЮ

Виконуючий обов'язки директора
Товариства з обмеженою
відповідальністю «Укрнасілляпром»
(ТОВ «Укрнасілляпром»)



Д.В. Іванов

М.П.

ЗАТВЕРДЖУЮ

Директор Інституту олійних
культур Національної академії
аграрних наук України
(ІОК НААН)



Е.Б. Алієв

М.П.

Акт

про впровадження результатів науково-дослідної роботи (НДР)

«16» вересня 2022 р.

Ми, що нижче підписалися, представник ТОВ «Укрнасілляпром» – головний технолог Зарицький О.М. та представники ІОК НААН – заступник директора з виробництва Балабай П.Ф. і молодший науковий співробітник Лупко К.О. склали цей акт в тому, що ІОК НААН розробив, а ТОВ «Укрнасілляпром» прийняло для впровадження у виробництво науково-методичні рекомендації з налагодження трієрного сепаратора насінневого матеріалу дрібнонасіллявих культур.

Зазначені науково-методичні рекомендації були розроблені в рамках виконання завдання «18.00.00.07.Ф Техніко-технологічне оснащення первинного насінництва олійних культур» (№ ДР 0120U105450). Основний внесок в їх розробку вклав виконавець НДР, молодший науковий співробітник відділу техніко-технологічного забезпечення насінництва Лупко К.О.

Прийняті рекомендації дозволили зменшити витрати електроенергії обладнання і машин для калібрування насіння на 6 % і зменшити витрати на працю на 5 %.

Фінансово-правові умови використання науково-технічної продукції обумовлюються окремими двосторонніми договорами.

Від ТОВ «Укрнасілляпром»

Головний технолог

Зарицький О.М.

Від ІОК НААН

Заступник директора з виробництва

П.Ф. Балабай

Молодший науковий співробітник
відділу техніко-технологічного
забезпечення насінництва

К.О. Лупко

Додаток Р

ЗАТВЕРДЖУЮ

Проректор з наукової та інноваційної діяльності Дніпровського державного аграрно-економічного університету (ДДАЕУ), д-р с.-г. наук, проф.


Юрій ТКАЧУК
«22» 7/2023 р.



ЗАТВЕРДЖУЮ

Директор ТОВ НВО «Сортувальні машини»


Станіслав МЕЛЬНИК
«22» 7/2023 р.



А К Т

про впровадження/використання результатів науково-технічної роботи

Даним актом стверджується, що результати науково-технічної роботи, які були виконані здобувачем третього (освітньо-науково) рівня вищої освіти ОНП «Галузеве машинобудування» Лупко К. О. і її науковим керівником д-ром техн. наук, старшим дослідником, професором кафедри інжинірингу технічних систем Алієвим Е. Б. впроваджені і використані на виробництві ТОВ НВО «Сортувальні машини» (ЄДРПОУ 43928874, 49000, Дніпропетровська область, м. Дніпро вул. Качалова буд.1 офіс 101

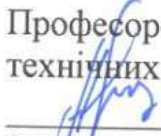
ТОВ НВО «Сортувальні машини» в особі головного інженера Мельника М.М. отримало конструкторську та технічну документацію на виготовлення експериментального зразка селекційно-насінницького трієра, який призначений для сепарації насіння дрібнонасінневих культур.

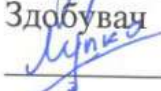
Отримана конструкторська та технічна документація буде використовуватися для виготовлення дослідних зразків вищезазначеного обладнання для проведення дослідно-виробничих випробувань.

Підписаний акт не встановлює фінансових зобов'язань між сторонами. Фінансові-правові умови використання науково-технічної продукції обумовлюються двосторонніми договорами.

Від ДДАЕУ

Професором кафедри інжинірингу технічних систем

 Ельчин АЛІЄВ

Здобувач
 Кристина ЛУПКО

«22» 7/2023 р.

Від ТОВ НВО «Сортувальні машини»


Головний інженер

 Михайло МЕЛЬНИК


«22» 7/2023 р.

Додаток С

ЗАТВЕРДЖУЮ

Проректор з наукової та інноваційної діяльності Дніпровського державного аграрно-економічного університету (ДДАЕУ), д.р.с.-г. наук, проф.

 Юрій ТКАЛІЧ
 «12» _____ 2023 р.

ЗАТВЕРДЖУЮ

Директор Товариства з обмеженою відповідальністю «ВНІС ГЕНЕТИКС» (ТОВ «ВНІС ГЕНЕТИКС»)

 Сергій ПОГОРІЛИЙ
 «12» _____ 2023 р.

А К Т

про впровадження/використання результатів науково-технічної роботи

Даним актом стверджується, що результати науково-технічної роботи, які були виконані здобувачем третього (освітньо-науково) рівня вищої освіти ОНП «Галузеве машинобудування» Лупко К. О. і її науковим керівником д-ром техн. наук, старшим дослідником, професором кафедри інжинірингу технічних систем Алієвим Е. Б. впроваджені і використані на виробництві Товариства з обмеженою відповідальністю «ВНІС ГЕНЕТИКС» (ЄДРПОУ 42169559, 03143, м. Київ, вул. Академіка Заболотного, 150 Г).

ТОВ «ВНІС ГЕНЕТИКС» отримало рекомендації з налагодження селекційно-насінницького трієра для сепарації, розділення і очищення насіння дрібнонасінневих олійних і зернових культур у вигляді відповідних математичних залежностей і конструктивно-технологічних схем.

Отримані рекомендації використовується при наукових дослідженнях в області селекції і генетики в ТОВ «ВНІС ГЕНЕТИКС». В результаті використання розроблених методичних засад налаштування і калібрування селекційно-насінницького трієра встановлено зменшення енерговитрат на 12,1 % і витрат на оплату праці на 9,5 %

Підписаний акт не встановлює фінансових зобов'язань між сторонами. Фінансові-правові умови використання науково-технічної продукції обумовлюються двосторонніми договорами.

Від ДДАЕУ

Професором кафедри інжинірингу технічних систем

 Ельчин АЛІЄВ

Здобувач
 Кристина ЛУПКО

«17» _____ 2023 р.

Від ТОВ «ВНІС ГЕНЕТИКС»

Начальник відділу селекції соняшнику

 Ярослава Шарипіна

«17» _____ 2023 р.

Додаток Т

Список публікацій здобувача, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації

Статті у періодичних наукових виданнях, проіндексованих у базах даних Web of Science Core Collection та/або Scopus:

1. Aliiev E., **Lupko K.** (2021). Prerequisites for the Creation of a Mechatronic System of Indented Cylinders for the Separation of Fine Seeds. *Scientific Horizons*. 24(3): 75–86. DOI: 10.48077/scihor.24(3).2021.75-86.
2. Aliiev E., **Lupko K.**, Kobets O. (2023). Development of adaptive seed-separation trier for small-seeded crops. *Bulletin of the Transilvania University of Brasov. Series II: Forestry. Wood Industry. Agricultural Food Engineering*. 6 (65), 1: 103–126. DOI: 10.31926/but.fwiafe.2023.16.65.1.8

Статті у наукових виданнях, включених до переліку наукових фахових видань України:

3. Алієв Е.Б., **Лупко К. О.** (2020). Морфологічні ознаки і фізико-механічні властивості насіння дрібнонасінних культур. *Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин*. 50: 27–35. DOI: 10.32515/2414-3820.2020.50.27-35.
4. Aliiev E., **Lupko K.** (2022). Results of numerical modelling of the process of separation of seed material of small-seeded crops on a cylindrical cell trier. *Machinery & Energetics*. 13(2): 9–19. DOI: 10.31548/machenergy2022.01.009.
5. Алієв Е.Б., **Лупко К. О.** (2023). Методика симуляції процесу сепарації насінневого матеріалу дрібнонасінневих культур на циліндричному чарунковому трієрі. *Вібрації в техніці та технологіях*. 1 (108): 36–44. DOI: 10.37128/2306-8744-2023-1-4.
6. Алієв Е.Б., **Лупко К. О.** (2023). Результати експериментальних досліджень селекційно-насінницького трієра. *Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки. ЦНТУ*. 7 (38), II: 67–74. DOI: 10.32515/2664-262X.2023.7(38).2.67-74.

Розділи монографії:

7. Алієв Е. Б., Миколенко С. Ю., Сова Н. А., Алієва О. Ю., Малєгін Р. Д., Лупко К. О., Лінко М. О., Гезь Я. В., Безугла Л. С. (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. ISBN 978-966-981-687-0.

Патент України:

8. Алієв Е. Б., Лупко К. О. (2023). Патент України на корисну модель №152573. МПК В07В 1/08 (2006.01). Адаптивний селекційно-насінницький трієр. Заявник: Інститут олійних культур національної академії аграрних наук України, № u202201745. Заявл. 26.05.2022. Опубл. 15.03.2023, бюл. № 11.

Статті у інших наукових виданнях:

9. Алієв Е.Б., Лупко К.О., Белка О.В., Алієва О.Ю. (2021). Трієрний сепаратор насінневого матеріалу дрібнонасінневих олійних культур. Науково-технічний бюлетень Інституту олійних культур НААН. 31: 118–132. DOI: 10.36710/іос-2021-31-11.

10. Алієв Е. Б., Лупко К. О., Долгіх Д. О. (2022). Фізико-математична модель взаємодії компонентів насінневої суміші дрібнонасінневих олійних культур із робочим органом трієра. Науково-технічний бюлетень Інституту олійних культур НААН. 32: 123-131. DOI: 10.36710/ІОС-2022-32–12.

Тези і матеріали конференцій:

11. Алієв Е. Б., Лупко К. О. (2020). Застосування трієрних сепараторів для очищення насіння дрібнонасінневих культур. Матеріали XXI Міжнародної наукової конференції «Сучасні проблеми землеробської механіки» (17–18 жовтня 2020 р.). Харків: ХНТУСГ. 116.

12. Лупко К. О. (2021). Сепарація насінневого матеріалу олійних культур на трієрах. Олійні культури: сьогодення та перспективи. Збірник тез Міжнародної наукової інтернет-конференції (31 березня 2021 р.). Запоріжжя. ІОК НААН. 108-109.

13. Алієв Е. Б., **Лупко К. О.** (2022). Результати симуляції процесу сепарації насінневого матеріалу дрібнонасінневих культур на циліндричному чарунковому трієрі при змінній частоті обертання. Матеріали науково-практичної інтернет-конференції «Сучасні напрями та досягнення селекції і насінництва сільськогосподарських культур» (26 квітня 2022 р.). Полтавський державний аграрний університет. 135–137.

14. **Лупко К. О.** (2023). Методика проведення експериментальних досліджень процесу сепарації дрібнонасінневих культур на лабораторному циліндричному чарунковому трієрі. Збірник тез Міжнародної наукової інтернет-конференції «Олійні культури: сьогодення та перспективи» (21 березня 2023 р.). Запоріжжя. ІОК НААН. 129–130.

15. **Лупко К. О.** (2023). Алгоритм роботи системи розпізнавання траєкторій польоту насіння по відеозображенню. Збірник матеріалів Міжнародної науково-практичної конференції «Зелене повоєнне відновлення продовольчих систем в Україні» (26 січня 2023 р.). Одеса. ІКОСГ НААН. 286–289.

Депоновані звіти:

16. Техніко-технологічне забезпечення комплексної безвідходної переробки рослинної сировини у біологічно цінні харчові продукти і кормові добавки: звіт про НДР (остаточний). МОН, ДДАЕУ; кер. Миколенко С.; вик.: Сова Н., Алієв Е., Безугла Л., Долгих Д., Алієва О., Піддубцева О., Плотка Л., Гезь Я., Тимчак Д., Худайбердієва К., **Лупко К.**, Лінко М., Малегін Р. Дніпро, 2022. 452 с. № ДР 0120U100322.

17. Техніко-технологічне оснащення первинного насінництва олійних культур: звіт про НДР (проміжний). Етап 2022 р.: Розробити адаптивну механотронну систему цільового поділу та відбору насінневого матеріалу олійних культур за спадковими ознаками. НААН, ІОК НААН; кер. Алієв Е.; вик.: Поляков О., Пацула О., Белка О., Усова Н., Нікітенко Н., Цапик Т., Школова С., **Лупко К.**, Доценко Є. Запоріжжя, 2022. 102 с. № ДР 0120U105450.